

VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Ověření účinků těsnící injektáže - Förbifart Stockholm
Verification of Sealing Grouting Effects on Project Förbifart
in Stockholm

Student: bc. Tomáš Němeček
Vedoucí diplomové práce: Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Němeček**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607/T035 Geotechnika
Téma: **Ověření účinků těsnící injektáže - Förbifart Stocholm**
Verification of Sealing Grouting Effects on Project Förbifart in Stocholm
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Představení projektu Förbifart Stocholm
3. Těsnící injektáže v podzemním stavitelství
4. Ověření účinků a vlastností směsi těsnící injektáže
5. Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


Klepsatel, F. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003, 215 s. ISBN 80-889-0543-5.
Turček, P., Klepsatel, F. *Podzemné stavby I*. Bratislava: STU, 2004. ISBN: 80-227-2273-1.
Kolymbas, D., *Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling*. Berlin: Springer, c2005, xv, 437 s. ISBN 35-402-5196-0.
Verfel, J. *Injektování hornin a výstavba podzemních stěn*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983.
Håkansson, U., Wiklund, J., & Kotze, M. (2017). *In-Line Determination of Cement-Based Grout Properties Using a Pulsed Ultrasound Based Method and System*. *Grouting 2017*, 356-367. <https://doi.org/10.1061/9780784480793.034>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2018

Datum odevzdání: 30.11.2018


doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠBTUO
- было с́една́но, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было с́една́но, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Anotace

Tato práce se ve svém obsahu věnuje těsnícím injekčním pracem jakožto součástí Skandinávské tunelovací metody Drill&Blast. V úvodu pojednává o významných tunelových projektech Skandinávie, na kterých bylo využito technologie pre-groutingu. Teoretická část se zejména věnuje popisu teorie šíření cementové suspenze skalním prostředím a vlastnostmi, které na injekční práce mají zásadní vliv. V následující kapitole práce popisuje metodiku ověření těsnících účinků injekčních prací a vlastností injekčních směsí. Ve svém závěru práce shrnuje a vyhodnocuje výsledky provedených zkoušek a zmiňuje se o technologiích, které jsou v současné době vyvíjeny k lepšímu kontrolování průběhu injekčních prací.

Klíčová slova

injekční práce, cementové suspenze, Lugeon test, vlastnosti injekčních směsí, Förfart Stockholm, pre-grouting

Abstract

The content of this thesis describes the sealing effect of grouting as part of the tunneling cycle of the Scandinavian tunneling method named Drill & Blast. The introduction presents some key tunneling projects in Scandinavia where pre-grouting was applied. The theoretical part is focused on description of cement-based grout spread theories in hard rock environment as well as the grout properties which directly impact the grout spread. Next chapter introduces the methodology which was used to verify the sealing effect of the grouting and the grout properties. The conclusion summarizes and evaluates the results of all executed tests and also mentions technologies which are currently being developed to improve the grouting performance.

Key words

grouting, cement grout, Lugeon test, grout properties, Förfart Stockholm, pre-grouting

Obsah diplomové práce:

Seznam použitého značení:	6
1 Úvod	7
2 Zkušenosti v oblasti injekčních prací na skandinávských projektech	8
3 Představení projektu Förbifart Stockholm	10
3.1 Geografický popis Stockholmu a doprava v regionu	10
3.2 Účel Förbifart Stockholm	11
3.3 Základní popisné informace o Förbifart Stockholm	12
3.4 Projekt FSE209	14
4 Těsnící injektáže v podzemním stavitelství	18
4.1 Proudění podzemní vody ve skalních horninách	19
4.2 Šíření injekční směsi v prasklinách	22
4.3 Vlastnosti injekčních směsí na bázi cementu	26
4.4 Injekční směsi používané na projektu FSE209	28
4.5 Provádění injekčních prací na projektu FSE209	30
5 Ověření účinků a vlastností směsi těsnící injektáže	32
5.1 Způsoby ověřování účinků těsnící injektáže	32
5.2 Způsob a metodika ověřování účinků těsnící injektáže na projektu FSE209	33
5.3 MWD data z průzkumných a injekčních vrtů v pasáži pod jezerem Mälaren	36
5.4 Injekční práce provedené v pasáži pod jezerem Mälaren	38
5.5 Vlastní zkoušky a jejich výsledky	40
5.6 Kontrola vlastností injekční směsi	44
6 Zhodnocení a závěr	45
7 Seznam použitých pramenů	47
8 Seznam obrázků	49
9 Seznam tabulek	50
10 Seznam grafů	51

Seznam použitého značení:

H	výška vodního sloupce [m]
I	penetrační délka injekční směsi [m]
I_D	relativní penetrační délka [-]
K	hydraulická vodivost [ms^{-1}]
L	délka [m]
MWD	data o průběhu vrtání
P	tlak [MPa]
Q	index kvality podle Norského geotechnického institutu
Q	průtok [l/min]
R	poloměr dosahu [m]
T_f	transmisivita prasklin [m^2s^{-1}]
T_s	transmisivita sekce [m^2s^{-1}]
V	objem [l]
VCR	vodní součinitel [-]
b	šířka praskliny
b_h	hydraulická šířka praskliny
b_{krit}	šířka praskliny ve které je směs schopna volně proudit
b_{min}	šířka praskliny kterou již není schopna směs proniknout
g	gravitační zrychlení [ms^{-2}]
i	hydraulický gradient [-]
p_g	tlak injekční směsi [MPa]
p_w	tlak vody [MPa]
r_0	poloměr vrtu [m]
t_0	charakteristická doba injektáže [min]
t_d	relativní čas injektáže [-]
μ	viskozita [Pas]
μ_g	viskozita injekční směsi [Pas]
τ_0	dynamická mez toku [Pa]
τ	Smykové napětí [Pa]

1 Úvod

Podzemní stavitelství ve Skandinávii má dlouhou historii a mnoho zdejších metod, technologií a mechanizace pro podzemní práce je dnes využíváno v celém světě. Průmysl spojený s důlní činností a různorodou podzemní výstavbou ve skandinávských městech je zdravé a fungující odvětví, soustřeďující mnoho odborníků, dodavatelských a vývojářských firem a také zkušených investorů nejen ze státního sektoru. I přesto, že podzemní stavby patří mezi náročná a nákladná inženýrská díla, ze strany vlády, měst i institucí, jako jsou dopravní inspektorát, vodárenské či energetické společnosti, se stále objevuje dostatek projektů, zajišťujících prosperitu a rozvoj celého odvětví.

Skandinávský poloostrov patří mezi nejstarší geologické jednotky Evropy se silně metamorfovanými horninami a hlubinnými vyvřelinami. Toto horninové prostředí, vhodné pro podzemní stavby, determinuje zásady skandinávské tunelovací metody Drill&Blast a dovoluje zrealizovat opravdu zajímavé a geotechnicky náročné projekty.

Země Skandinávského poloostrova patří dlouhodobě mezi přední evropské země a je zřejmé, že společnost si uvědomuje dopad svého fungování na životní prostředí. I z tohoto důvodu, je zejména ve velkých městských aglomeracích, mnoho dopravních staveb umisťováno do podzemí. Ačkoli je toto z environmentálního hlediska dobré řešení má i svá negativa. Podzemní stavby mají vliv na rezervoáry podzemní vody, které jsou zde zákonem chráněny. Injekční práce, jakožto nástroj k řešení problémů, spojených s podzemní vodou, v prostředí pevných skalních hornin zaznamenaly i proto ve Skandinávii v posledních několika letech veliký pokrok. Jedná se o činnost, která je součástí každého podzemního díla, zářezů či přehrad, budovaných na skalním podloží, tedy objektů, vystaveným různým účinkům proudící vody, a to jak během výstavby, tak zejména během jejich provozu. Injekční práce jsou používány k vyplnění prasklin v masívu, čímž je redukován průtok vody v proinjektovaném prostoru a jeho vliv na okolní prostředí.

Tato práce čerpá zejména z poznatků, získaných během ražeb tunelů projektu FSE209 Bergtunnlar Skärhomen, který je dílčím projektem západního obchvatu města Stockholmu. Práce na obchvatu byly zahájeny již v roce 2014, avšak projekt FSE209 byl zahájen až v únoru roku 2017. Ražby jsou prováděny skandinávskou razicí metodou Drill&Blast, jejíž součástí je těsnící injektáž předpolí, tzv. pre-grouting. Od počátku zahájení razicích prací bylo provedeno přes 600 injekčních clon, což poskytuje velice objemnou databázi dat, vhodných pro analýzu těsnících účinků injekčních prací. Nicméně je vhodné se na začátek stručně zmínit také o jiných skandinávských stavbách, kde bylo využíváno těsnících injektáží.

2 Zkušenosti v oblasti injekčních prací na skandinávských projektech

Jelikož se většina zásadní stavební činnosti ve Skandinávii koncentruje do měst, kde se nacházejí také univerzity, provádějící na stavbách nejrůznější studie, byly současné teorie v oblasti injekčních prací zkoumány a ověřovány zejména na stockholmských projektech realizovaných v posledních patnácti letech. Je to do jisté míry dáno také tím, že na Královské Technické Univerzitě ve Stockholmu se tomuto oboru věnuje početná skupina odborníků, v čele s profesorem Håkanem Stillem.

První příležitostí pro ověření některých teorií o šíření injekční směsi skalním masívem se stal projekt Norra Länken neboli „Severní Spojka“. Jedná o severní část tunelového okruhu, budovaného kolem Stockholmu, pro automobilovou dopravu. Tento 9 km dlouhý tunelový komplex, s profily tunelů 8 až 16 m², začal být budován v roce 2007 a pro dopravu byl otevřen v roce 2014. Ražba probíhala v prostředí žuly a sedimentární ruly, přičemž hladina podzemní vody se ve většině území nacházela pouze několik metrů pod povrchem. K minimalizaci vlivu ražeb na podzemní vodu byla na tomto projektu využita metoda pre-groutingu, která bude dále v textu podrobněji popsána. Typické vějíře injektážní těsnící clony byly hluboké 22 m a k optimalizaci účinku těsnících injektáží se již zde využívalo dat z vrtání injekčních vrtů, zvaných MWD data (Measurement While Drilling). Na základě MWD dat je možné predikovat slabší či více propustnou horninu. Injekční směs, zde používaná, byla z mikrocementu Cementa IC30 s vodním součinitelem 0,8 a obvykle byla do vrtů vháněna tlakem 2,3 až 3 MPa, což dle projektu injekčních prací mělo zajistit čtyřmetrovou utěsněnou zónu kolem profilu díla. Tento projekt posloužil zejména k ověření teorií o proudění injekční směsi v prasklinách. Porovnáním předpokládaného průtoku injekční směsi, stanoveného na základě vztahů uvedených v kapitole 4.2 Šíření injekční směsi v prasklinách a záznamů skutečných dat injektáže z injektážních stanic se potvrdily tehdejší teoretické poznatky. [4]

Dalším projektem, využívajícím pre-groutingu, který předcházel projektu Förbifart Stockholm, byl projekt City Banan. Jedná se o 6 km ražených tunelů, procházejících pod centrálním Stockholmem ze severu na jih, dvojnásobně navyšující kapacitu tratí pro vlakovou dopravu. Součástí projektu byly dvě nové podzemní vlakové stanice, přičemž jedna z nich se nachází v nižší úrovni stockholmského hlavního nádraží T-Centralen. Podobně jako v případě Norra Länken se tunely nachází v prostředí žuly a sedimentární ruly, avšak s hladinou podzemní vody v těsné blízkosti pod povrchem. Pre-grouting jako součást razíciho cyklu, zde byl studován zejména z pohledu optimalizace tzv. stop kritérií, na základě metody zvané RTGC (Real Time Grouting Control). Jedná se o analýzu průběhu injekčních prací, na základě dat,

kteřá v reálnem čase zaznamenává injekční stanice. Jsou jimi čas, tlak, průtok a objem. Vrtý těsnícího vějíře byly hluboké 22 m s maximální povolenou vzdáleností mezi konci jednotlivých vrtů 2,5 m. Rádus projektované utěsněné zóny okolo profilu díla byl 4 m. Injekční směs byla i zde na bázi cementu IC30 s vodním součinitelem 0,8. Tlak pro injekční práce se pohyboval v rozmezí 1 až 2 MPa. Asi nejzajímavějším přínosem studie, provedené na projektu City Banan, byl závěr, že pomocí RTGC je možné vyvodit jakým způsobem, liniově (1D) nebo plošně (2D), směs proniká prostředím, a tedy stanovit skutečnou penetrační délku injekční směsi. Na základě těchto informací lze během injektáže upravovat stop kritéria a zkrátit tak čas injekčních prací, a přesto dosáhnout požadované penetrační délky. [4]

Projekty Nora Länken a City Banan mají velice podobné výchozí parametry, a proto i přístup k injekčním pracem je na těchto projektech velice podobný. Pro ukázkou toho, co může ve Skandinávii také nastat, je zde stručně popsána zkušenost české firmy Metrostav a.s. z realizace tunelu Hédinsfjörður na Islandu. Jedná se o dva silniční tunely, spojující města Siglufjörður a Ólafsfjörður, v celkové délce ražeb 10 km. Ražba skandinávskou tunelovací metodou procházela převážně olivinickými čedičovými útvary, kde nadloží dosahovalo výšky 800 m. Největší výzvou pro raziče byly lokální extrémní přítoky vody, přesahující 600 l/min (obr. 1). Lokálně zde tedy bylo zkoumáno předpolí, pomocí průzkumných předvrtů a v místech potřeby prováděn pre-grouting, pomocí cementových či chemických injekčních medií. Vzhledem k extrémní povaze přítoků bylo převážně využíváno dvousložkové polyuretanové pryskyřice CarboPur WF. Účinek injekčních prací byl následně ověřován kontrolními vrty. [7]

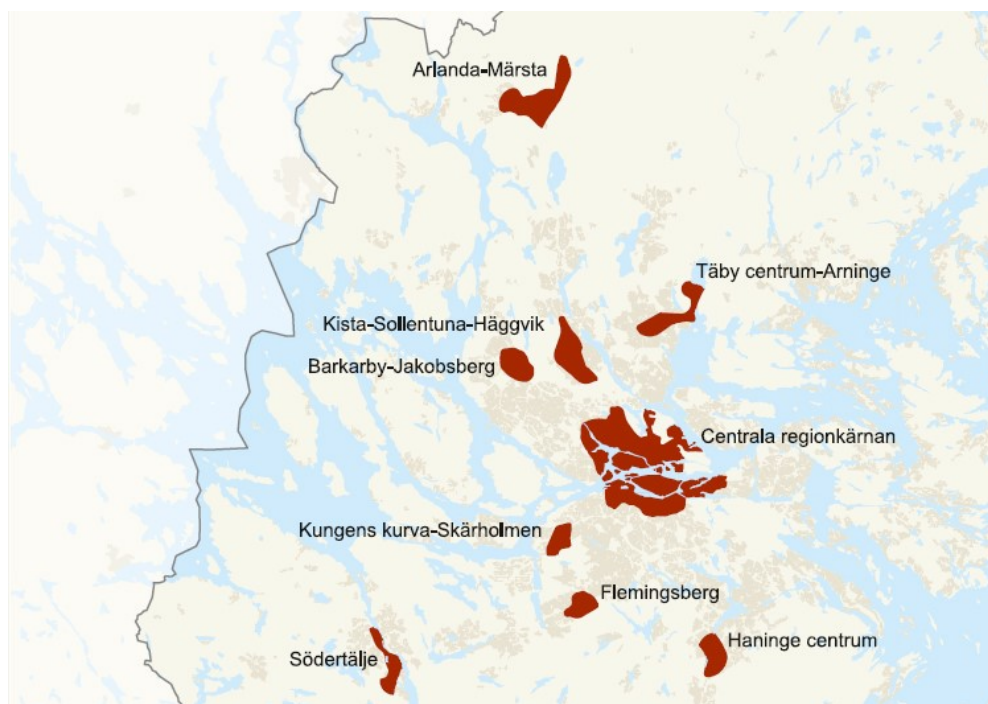


Obr. 1 extrémní přítoky podzemní vody během ražby tunelu Hédinsfjörður. Zdroj [7]

3 Představení projektu Förbifart Stockholm

3.1 Geografický popis Stockholmu a doprava v regionu

Město Stockholm se nachází na východním pobřeží Švédského království, v místě kde se setkávají sladkovodní jezero Mälaren a Baltské moře. Historicky je to právě přístupnost jezera Mälaren pro lodní dopravu z Baltského moře, která způsobila rozvoj Stockholmu. Město z této své pozice těží dodnes a přilehlé přístavy patří mezi rušná místa v oblasti. Nicméně, četné vodní plochy, rozdělující region na tisíce různě velikých ostrovů, nejsou optimální pro ostatní dopravu. Budeme-li hovořit o automobilové dopravě, je kapacita její současné silniční sítě zcela nedostačující pro každodenní potřeby města a limituje jeho další rozvoj. I přesto, že město disponuje dobře fungující městskou hromadnou dopravou v podobě autobusů, tramvají, metra, podzemních vlakových spojení či lodí, jsou hodiny strávené v zácpách denním chlebem pro značné procento obyvatel, cestujících automobilem. Důvodem je prudký nárůst obyvatelstva v regionu a s tím spojený vznik nových městských center s jejich rezidenčními částmi, službami i pracovními příležitostmi v okolí Stockholmu (obr. 2). Pro představu, dle údajů Migrationsverket (Švédský migrační úřad), očekává stockholmský region do roku 2030 nárůst populace ze současných 2 mil na 2,4 mil obyvatel. [2, 14] S faktem, že nově příchozí se koncentrují v okolí Stockholmu, kde je dostupnější bydlení, roste potřeba cestovat městem do nových, rozvíjejících se městských částí, kam často nedosáhne síť městské hromadné dopravy.

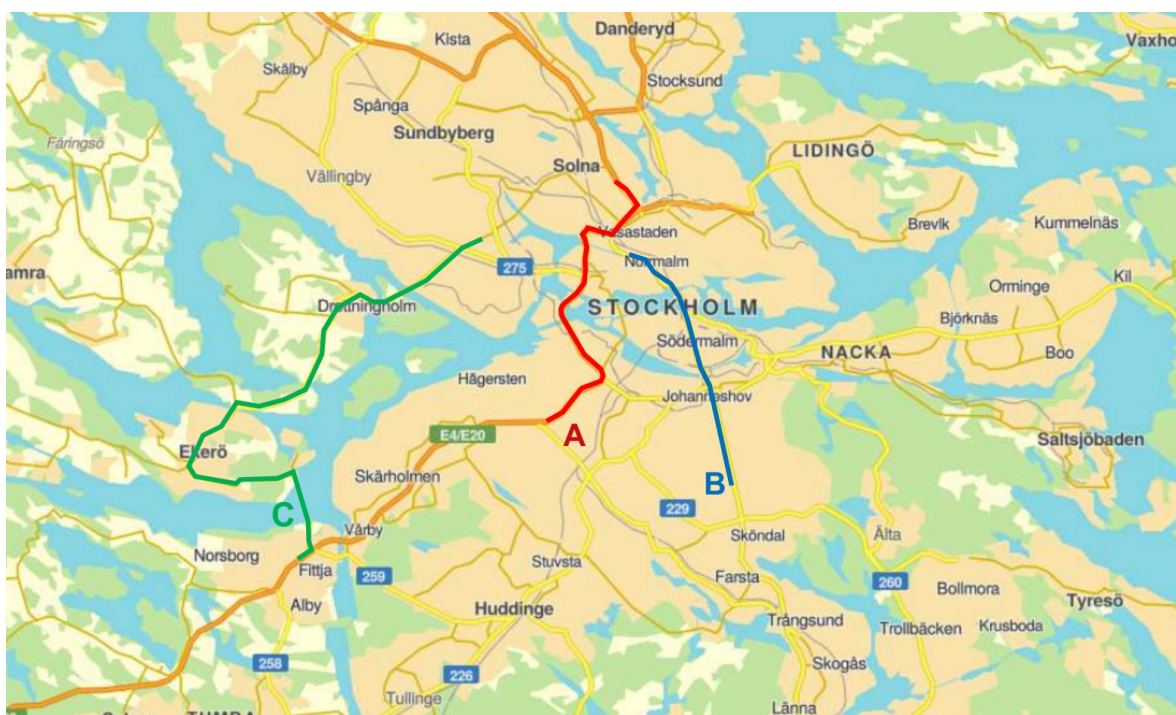


Obr. 2 nová městská centra v okolí Stockholmu. Zdroj [2]

3.2 Účel Förbifart Stockholm

Překlad slova „förbifart“ znamená míjet, obejít. Jedná se tedy o západní obchvat Stockholmu, odklánějící projíždějící automobilovou dopravu mimo město. Důvody pro výstavbu obchvatu jsou v podstatě dva. První, popsany v kapitole 3.1, je rostoucí počet automobilů, cestujících přes jezero Mälaren, rozdělující Stockholmský region na jižní a severní část. Druhým důvodem je nedostatek alternativních tras, zajišťujících toto severojižní spojení přes jezero. V současné době existují pouze tři, z toho dvě mají na celou dopravní situaci minimální vliv. Nejdůležitější z nich tzv. trasa Essingeleden (obr. 3 – A), která je součástí vnějšího městského okruhu a zároveň celostátní silnice E4. Dále kapacitně výrazně slabší silnice 73 (obr. 3 – B), protínající centrum Stockholmu. A třetí, při níž je nezbytné využít lodní přepravu, vede přes ostrov Ekö (obr. 3 - C). [2]

Essingeleden je hlavním článkem severojižního spojení a je situací ve Stockholmu přímo ovlivněna. Její kapacita 80 000 vozidel/den nebyla změněna od roku 1967, kdy byla otevřena. V současné době je její zátěž 160 000 automobilů v typickém pracovním dni. Vjezdy do města jsou v důsledku aut, která pouze projíždějí, přetíženy a celý dopravní systém je náchylný ke kolapsu, z důvodu nedostatku alternativních tras. Proto byl Förbifart Stockholm vybrán jako klíčový projekt pro zvýšení kapacity silnic, vedoucích přes jezero Mälaren pro automobilovou, autobusovou i komerční dopravu, což by mělo ulevit tlaku na železniční spojení a zejména na zmiňovanou trasu Essingeleden. [2]



Obr. 3 silniční spojení přes jezero Mälaren. Zdroj [2]

Pilotní studie spojení mezi severní a jižní částí města byla provedena v roce 2001. Závěr této studie potvrdil, že stávající spojení potřebuje nevyhnutelně posílit. Během let 2002 až 2005 se pracovalo na studii proveditelnosti, během níž se porovnávaly tři varianty, řešící dopravní spojení přes jezero Mälaren:

- 1. Projekt Förbifart Stockholm – převážně tunelový obchvat, začínající na silnici E4/E20 v jižní části města zvané Kungens Kurva, pokračující na sever přes části Sättra, Kungshatt, Lovön, Vinsta, Lunda, Hjulsta a pak dále na E4 směr Häggvik (obr. 4).
- 2. Projekt Diagonal Ulvsunda – obchvat, vedený blíže městu, začínající na silnici E4/E20 v části Kungens Kurva, pokračující přes Västertrop, Ulvsundaplan, Kvarnbacken, Solvalla, Enköpingsvägen, Kista a napojující se na E4 pod městem Häggvik. Výhodou tohoto řešení bylo napojení na stávající tunelovou stavbu, tvořící jižní obchvat města, zvanou Södra Länken.
- 3. Kombinační alternativa – pokus o spojení nových silničních projektů a projektů veřejné hromadné dopravy (železnice, tramvajové spoje apod.) se stávající infrastrukturou.

V roce 2006 bylo rozhodnuto realizovat variantu Förbifart Stockholm a po letech plánování, projektování a připomínkování ji v roce 2014 vláda definitivně schválila. [2, 12]



Obr. 4 podélný řez trasy Förbifart Stockholm. Zdroj [13]

3.3 Základní popisné informace o Förbifart Stockholm

Jedná se o jeden z největších infrastrukturních projektů ve Švédsku, který dle vyjádření zadavatele Trafikverket zároveň patří mezi největší tunelové stavby světa, realizované v městské oblasti. Trasa obchvatu je dlouhá 21 km, z čehož 18 km je vedeno tunely. Dva paralelní tubusy tunelů hlavní trasy obchvatu povedou z městské části Skärholmen pod jezerem Mälaren

až do části Lunda, což je trasa dlouhá 16,5 km (33 km ražeb). Součástí tunelů hlavní trasy obchvatu v tomto úseku jsou nájezdové a výjezdové rampy v podobě menších tunelů s profilem okolo 100 m², v celkové délce cca 20 km, dále pak tunelové propojky a pracovní tunely různého účelu. V části Lunda vychází trasa na povrch do křížení Hjulsta, ze kterého pokračuje do dalšího tunelového úseku zvaného Akalla, dlouhého 1,8 km. Ten zahrnuje ražbu dvou tubusů tunelů hlavní trasy a menšího přístupového tunelu. Celá trasa obchvatu je znázorněna na podélném řezu trasy (obr. 4). [2, 11]

Zadavatelem je státní organizace Trafikverket (obdoba českého ŘSD), která bude celý projekt realizovat pomocí až dvou desítek hlavních dodavatelů, s kontrakty v hodnotě 500 až 3 000 mil SEK. Práce na ražbách tunelů jsou kritickou částí celého projektu a jejich celkový objem je roven bezmála 6 500 000 m³ vytěžené horniny. Tyto práce jsou rozděleny do osmi dílčích projektů různé velikosti a charakteru (tab. 1). Obchvat bude v šesti svých místech na povrchu napojen na existující silniční síť, a to prostřednictvím nově vybudovaných křížení, mostů, zářezů a hloubených i ražených tunelů. Dvě velká křížení vzniknou poblíž E4, na začátku a konci obchvatu, v oblastech Kungens kurva a Häggvik, dále pak v oblasti Hjulsta se silnicí E18, se silnicí 275 ve Vinstē a silnicí 261 na ostrově Löve (obr. 4). [2]

Kapacita obchvatu je projektována na 140 000 aut/den, ve třech pružích v každém směru. Doba průjezdu celé trasy je 15 min. Förbifart Stockholm tím přispěje k rozvoji celého regionu, zajistí alternativní spojení přes jezero Mälaren, čímž se zvýší komfort stockholmského automobilového provozu. V neposlední řadě poskytne další možnosti cestování městskou hromadnou dopravou. [2]

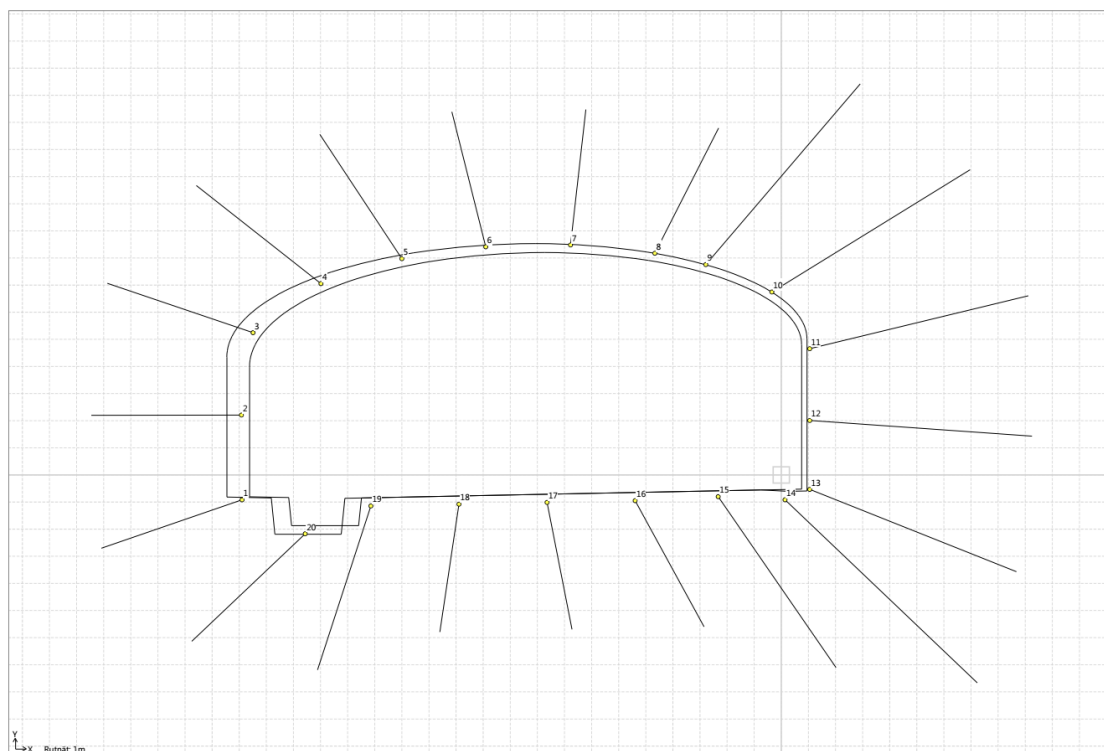
OZNAČENÍ PROJEKTU	NÁZEV PROJEKTU	POPIS	OBJEM VYRAŽENÉ HOR.	PŘEDPOKLÁDANÁ DOBA REALIZACE
FSE209	Bergtunnlar Skärholmen	hlavní tunel a nájezdové rampy	1 400 000 m ³	2016 - 2022
FSE210	Arbetsunnel Skärholmen	pracovní tunely a nájezdové rampy	91 000 m ³	2015 - 2016
FSE302	Bergtunnlar Norra Lovö	přístupový tunel, hlavní tunel	1 060 000 m ³	2015 - 2022
FSE308	Bergtunnlar Södra Lovö	přístupový tunel, hlavní tunel a nájezdové rampy	1 544 000 m ³	2015 - 2022
FSE403	Bergtunnlar Johannelund	hlavní tunel a nájezdové rampy	1 500 000 m ³	2015 - 2022
FSE410	Bergtunnlar Lunda	hlavní tunel	416 000 m ³	2016 - 2021
FSE607	Arbetslunnel Akalla	přístupový tunel	12 000 m ³	2015 - 2016
FSE613	Bergtunnlar Akalla	hlavní tunel	400 000 m ³	2017 - 2021

Tab. 1 Dílčí projekty Förbifart Stockholm. Zdroj [2]

3.4 Projekt FSE209

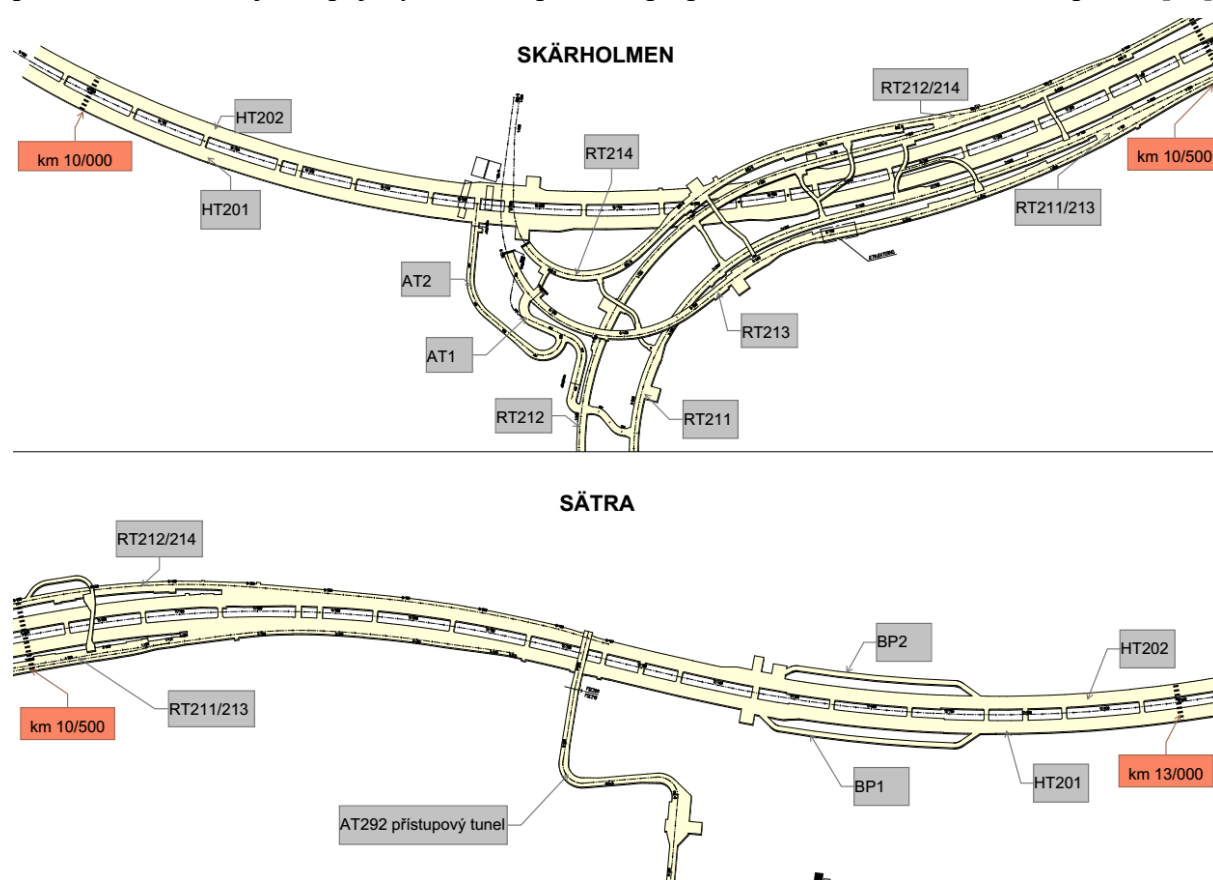
Projekt FSE 209 je jedním ze tří největších kontraktů na celém obchvatu (pozn. projekty Södra a Norra Lovö byly vysoutěženy jako jedna dodávka). Práce na projektu zahrnují ražby dvou paralelních tubusů tunelů hlavní trasy obchvatu, dlouhých 4 015 m (km 9/935 – km 13/950), dvojici nájezdových a dvojici výjezdových tunelových ramp a mnoho dalších podzemních objektů různého účelu, jako jsou tunelové propojky či výklenky. Technologie ražeb podléhá principům skandinávské razící metody Drill&Bast s kontinuální těsnicí injektáží předpolí, tzv. pre-grouting. [3]

Celý čtyřkilometrový úsek je poměrně důkladně zmapovaný, pomocí množství geologických a hydrogeologických vrtů a geofyzikálních průzkumných metod. Až na připortálové úseky a místa s nízkým nadložím se razí ve skalním prostředí, které tvoří ruly a různě zrnité žuly, jež jsou pro stockholmský region typické. Ve Švédsku se běžně využívá klasifikace horniny dle indexu Q (Barton) na jehož základě je horninové prostředí rozděleno do pěti horninových tříd, jež dále slouží pro určení třídy vyztužení výrubu a stupeň těsnicí injektáže. Třídy vyztužení výrubu definují míru a typ zajištění, tedy kotevní prvky a stříkaný beton. Projektová dokumentace pak dále udává tři stupně těsnicí injektáže (A, B a C), kde C, s největší hustotou injekčních vrtů, se používá ve zhoršených hydrologických podmínkách. V typickém profilu tunelu o 120 m² je navrtáno 20-60 vrtů, dle stupně těsnicí injektáže (obr. 5)



Obr. 5 Vrtné schéma těsnicí clony typu A v hlavním tunelu HT201. Zdroj [autor Underground Manager]

Situace projektu je částečně znázorněna na obrázku č. 6, na kterém je úsek mezi staničeními km 10/000 a km 13/000. Ze situace je patrné, že veškeré práce probíhají současně ze dvou lokalit, jmenovitě Skärholmen a Sättra, od sebe vzdálených přibližně 2 km. V lokalitě Skärholmen, ležící mezi silnicí E4 a přilehlou rezidenční zástavbou, se nachází, z pohledu ražeb, poměrně komplikované podzemní křížení. Oproti tomu v lokalitě Sättra, umístěné v přírodní chráněné rezervaci, v těsné blízkosti jezera Mälaren, se razí, z pohledu trajektorie, jednoduché tunely hlavní trasy. Z důvodu své pozice, v chráněné oblasti, zde není možné využívat k přepravě rubaniny kolovou dopravu, a proto zde byl vybudován provizorní plovoucí přístav, ze kterého je rozpojený materiál po vodě přepravován na místo dočasné deponie. [10]



Obr. 6 Situace části projektu FSE209 mezi staničením km 10/000 a km 13/000. Zdroj Zdroj [autor AutoCAD 2019]

Projekt FSE209 je jižním začátkem celého obchvatu. Ražené tunely hlavní trasy zde navazují na hloubenou část, jež se napojuje na stávající komunikaci E4, směrem na jih. Na svém severním konci tunely hlavní trasy budou navazovat na práce sousedního projektu FSE308 Södra Lovö. Ražby v tomto úseku procházejí několika složitými místy, od ražby v prostředí porušených zón, po nízké nadloží. Na tyto situace projektová dokumentace reaguje obvykle zkrácením záběru, jehlováním a aplikací stříkaného betonu, po každém záběru. Asi nejsložitější však bude ražba pod jezerem Mälaren, mezi staničením km 12/500 – km 12/700,

kde byl v prosinci roku 2017 proveden dodatečný geologický a geotechnický průzkum, v podobě několika jádrových vrtů v ose díla. Důvodem tohoto průzkumu byly zhoršující se podmínky na čelbách, postupujících směrem k jezeru a také nepřipravenost realizační dokumentace na horší horninovou třídu než III ($1 < Q \leq 4$). Provedený průzkum prokázal, že horninové prostředí v úseku pod jezerem lokálně prochází silně porušeným skalním až polosklaním prostředím horninové třídy IV ($0,1 < Q < 1$) a V ($Q < 0,1$). Reakcí na tato nová zjištění bylo přeprojektování celého úseku, nové smluvní podmínky a zejména autorský dohled projektanta, zodpovědného za nový projekt přímo na stavbě od počátku ražeb. Změny v projektové dokumentaci zásadně ovlivnily celou koncepci postupu prací v tomto úseku, jelikož náročnost jejich realizace prodlouží ražby zhruba o jeden rok. I z důvodu zmírnění časových ztrát budou, po obou stranách tunelů hlavní trasy, ražena průzkumná provizorní díla, tzv. Bypass 1 a Bypass 2. Dalším důvodem je také získání lepší představy o rozsahu poruchy pod jezerem. Změněná projektová dokumentace dále zavádí novou technologii ražeb, ve Skandinávii spíše ojedinělou, a to ražby pod ochranou mikropilotového deštníku. Jak v tunelech hlavní trasy, tak průzkumných dílech, budou v nejhorší třídě, tzn. v horninové třídě V a IV, ražby zahájeny rozsáhlou dvoukolovou injektáží a následně bude navrtán mikropilotový deštník, o průměru 140 mm, v tunelech hlavní trasy, resp. 70 mm v provizorních dílech, délky 16 m. Pod ochranou mikropilotového deštníku bude za značných omezení vyraženo deset metrů, tak aby vzniklo pět metrové překrytí jednotlivých deštníků. V hlavních tunelech bude výrub členěn, jak horizontálně, tak vertikálně a záběr bude omezen na pouhé 2 m. Veškeré prvky zajištění výrubu budou aplikovány po každém záběru. Nejedná se pouze o stříkaný beton a kotvy, nýbrž také o dvě řady sítí a stabilizační nástřik čelby drátkobetonem. Pro provizorní díla jsou prvky zajištění výrubu v podstatě totožné, pouze jejich dimenze je menší, úměrně k velikosti profilu díla. [3, 10, 11]

Jak je patrné z obrázku 6, situace projektu FSE209, v oblasti Skärholmen, se nachází čtyři tunelové rampy, jmenovitě RT211, RT212, RT213 a RT214. Jedná se o podzemní křížení, kde dvojice ramp RT211 a RT212 zajišťuje napojení tunelů hlavní trasy na silnici E4, směrem do centrálního Stockholmu a tunelové rampy RT213 a RT214 spojení tunelů hlavní trasy s centrem městské části Skärholmen, odkud budou vyjíždět autobusy městské hromadné dopravy. Ražby tunelových ramp podléhají většinou stejným omezením, jako výše zmíněné tunely hlavní trasy, a to v místech s nízkým nadložím, v místech poruch či v blízkosti existujících podzemních objektů, např. tunelů stockholmského metra. Zajímavým a z pohledu celého projektu ojedinělým, je úsek tunelové rampy RT213, mezi staničením km 0/690 až km 0/740. Zde totiž hluboká morénová vrstva zasahuje do části profilu raženého tunelu, což

znemožňuje efektivní ražbu pomocí trhacích prací s minimem zajišťovacích prvků. Aby bylo možné i zde postupovat pomocí trhacích prací, se záběrem minimálně 3 m, byla zde v létě 2018 z povrchu provedena rozsáhlá trysková injektáž. Účinek těchto prací na zlepšení mechanických parametrů prostředí v úrovni tunelové rampy RT213 byl ověřen jádrovými vrty, které indikují lepší, než předpokládané, parametry. Ražba tohoto úseku, která plně ověří účinek provedené tryskové injektáže bude zahájena v druhé polovině roku 2019. Stručný přehled základních informací o tunelech hlavní trasy a tunelových rampách je uveden v tabulce 2. [3, 10, 11]

TUNEL	PLOCHA VÝRUBU	ŠÍŘKA	VÝŠKA	DÉLKA	OBJEM VYTĚŽENÉ RUBANINY
HT201	120-125 m ²	15,5 m	8,5 m	4 015 m	468 545 m ³
HT202	120-125 m ²	15,5 m	8,5 m	4 015 m	469 885 m ³
BP1	80 m ²	10 m	8 m	200 m	16 000 m ³
BP2	80 m ²	10 m	8 m	200 m	16 000 m ³
R211	90 m ²	10-12 m	7,5 m	1 785 m	82 201 m ³
R212	90 m ²	10-12 m	7,5 m	1 947 m	68 951 m ³
R213	90 m ²	10-12 m	7,5 m	1 231 m	67 489 m ³
R214	90 m ²	10-12 m	7,5 m	850 m	52 585 m ³

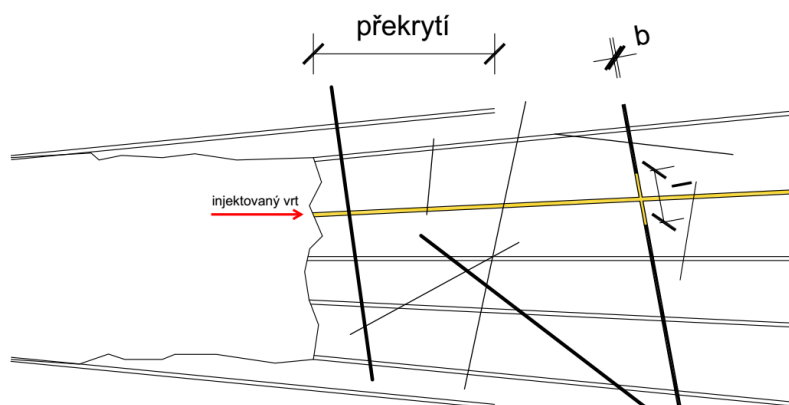
Tab. 2 přehled základních parametrů tunelů hlavní trasy a tunelových ramp. Zdroj [3]

Do rozsahu prací projektu FSE209 nepatří pouze ražby, nýbrž také práce na hydrantní síti, kanalizaci, odvodnění, příprava pro elektroinstalaci, rozličných betonových konstrukcích, definitivním ostění či například na dodávce obslužného jeřábu do požární stanice, která se bude nacházet v kaverně přístupového tunelu v Sätře. Nejedná se o kompletní výčet prací po ražbách, ale i z výše uvedeného je patrné, že projekt je vskutku rozmanitý a organizačně poměrně náročný.

4 Těsnící injektáže v podzemním stavitelství

Díla ražená pod úrovní hladiny podzemní vody fungují jako dreny a tím ovlivňují hydrologické poměry ve svém okolí. Množství vody, přitékající do tunelu, je dáno výškou vodního sloupce a hydraulickou vodivostí daného prostředí. Voda, přitékající do tunelu, může také značně komplikovat celý razicí cyklus. Prakticky každá operace je značně ztížena, pokud přítoky přesáhnou zvládnutelnou míru. V takovém případě dochází k časovým prostoje a v některých případech dokonce přerušení prací. Během provozování tunelových staveb mohou i malé průsaky způsobit značný nárůst vlhkosti, což dále způsobuje funkční problémy technologií, díky korozi. Environmentální dopad, v podobě poklesu hladiny podzemní vody, pak způsobuje vysychání studní. V neposlední řadě může mít proudící voda erozní účinky na výplň prasklin v masivu. Proudící voda totiž způsobuje v prasklinách smyková napětí, která když překročí smykovou odolnost materiálu v prasklinách, začne voda unášet částice materiálu a dochází k zvětšování světlosti šířky prasklin a postupnému nárůstu smykových napětí. [4]

Obecně je snahou všech, jak dodavatelských firem, tak provozovatelů díla, přítoky vody maximálně redukovat nebo jím zcela zabránit. V běžné praxi skandinávského prostředí se k tomuto využívá injekčních prací a zejména metody zvané „pre-excavation grouting“, zkráceně pre-grouting. Jedná se o primární činnost razicího cyklu metodou Drill&Blast. Pre-grouting začíná navrtáním vrtů do předpolí tunelu, po obvodu jeho profilu. Následně se skrze obturátory, pomocí injektážní jednotky, injektuje do vrtů těsnící směs pod tlakem větším, než je tlak podzemní vody, aby došlo k šíření směsi do prasklin. Samotná injektáž je kontrolována tzv. stop kritérii (čas, průtok, tlak, maximální objem směsi), po jejichž dosažení se považuje injektážní clona za dokončenou. Další clona se obvykle umísťuje tak, aby došlo k překrytí s předchozí clonou, z důvodu zajištění co nejlepšího těsnícího efektu v kritických místech konců těsnících clon, viz obr. 7.



Obr. 7 Těsnící injektáž předpolí (Pre-grouting) se znázorněnou šířkou praskliny b a penetrační délkou injekční směsi I. Zdroj Zdroj [autor AutoCAD 2019]

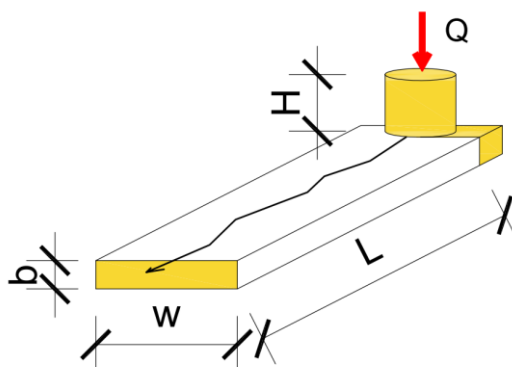
4.1 Proudění podzemní vody ve skalních horninách

Kapitoly 4.1 a 4.2 vycházejí z obecně platných hydrogeologických vztahů a závěrů švédského výzkumu v oblasti injekčních prací, které ve svých pracech shrnuje profesor Håkan Stille.

V prostředí skalních hornin dochází k proudění podzemní vody téměř výhradně v prasklinách skalního masívu. Pohyb vody se dá popsat jako liniový (1D) a plošný (2D). V případě liniového proudění se jedná o takové prostory v masivu, kdy jeden rozměr (x) převažuje nad zbylými dvěma (y , z), viz obr. 8. V případě plošného šíření vody dva rozměry (x , y), přibližně stejné, převažují nad jedním (z), viz obr. 9. Pro 1D proudění lze velikost průtoku Q (m^3/s) vyjádřit vztahem:

$$Q = \frac{\rho g}{12\mu} w b^3 \cdot i$$

Kde ρ je hustota vody ($1\,000\text{ kg/m}^3$), μ je viskozita vody ($1,3 \cdot 10^{-3}\text{ Pas}$), i je hydraulický gradient (H/L).

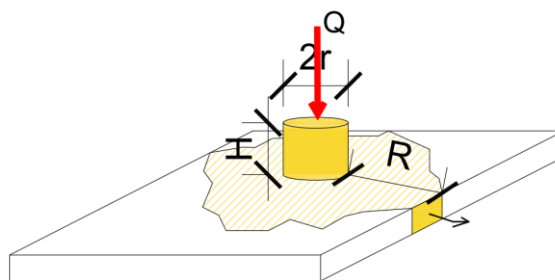


Obr. 8 1D proudění. Zdroj Zdroj [autor AutoCAD 2019]

Pro případ plošného šíření (2D) lze velikost průtoku Q vyjádřit analogickým vztahem:

$$Q = \frac{2\pi H}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \frac{\rho g}{12\mu} b^3$$

Kde ρ je hustota vody ($1\,000\text{ kg/m}^3$), μ je viskozita vody ($1,3 \cdot 10^{-3}\text{ Pas}$), R je poloměr dosahu (m), r_0 je poloměr vrtu (m).



Obr. 9 2D proudění. Zdroj [autor AutoCAD 2019]

Transmisivita, $T_f (\text{m}^2 \text{s}^{-1})$, prasklin slouží jako popisný parametr specifického průtoku v prasklinách a dá se vyjádřit vztahem:

$$T_f = \frac{\rho g}{12\mu} b^3$$

Kde b představuje světlou šířku praskliny. V heterogenním prostředí skalních hornin se světla šířka prasklin stanovuje velmi obtížně, a to z důvodu mnoha neznámých faktorů, jakými jsou nepravidelnost šířky puklin, zlomy či charakter jejich výplně. Z tohoto důvodu se bude v různých místech praskliny měnit také velikost průtočnosti. Proto se zavádí veličina b_h (hydraulic aperture), která představuje rovinné 2D proudění v ploše šířky b_h , se stejným průtokem. Vztah mezi transmisivitou prasklin a jejich šířkou je uveden v tabulce 3. Tato veličina je ověřitelná vodní tlakovou zkouškou tzv. Lugeon testem a je dána vztahem:

$$b_h = \sqrt[3]{\frac{T_f \cdot 12\mu}{\rho g}}$$

$T_f (\text{m}^2/\text{s})$	$b_h (\text{mm})$
10^{-3}	1,06
10^{-4}	0,49
10^{-5}	0,23
10^{-6}	0,11
10^{-7}	0,049

Tab. 3 vztah mezi průtočností puklin a jejich šířkou. Zdroj [4]

Pro sestavení modelu systému puklin ,z hlediska popisu šíření vody, ve skalním prostředí je možno využít několika přístupů. Tím praktičtější je popis většího celku skalního masívu, pomocí průměrných hodnot parametrů popisujících, proudění vody ve zkoumané sekci. Jedním z parametrů je transmisivita T_s (m^2/s) zkoumané sekce, která je dána vztahem:

$$T_s = K \cdot L$$

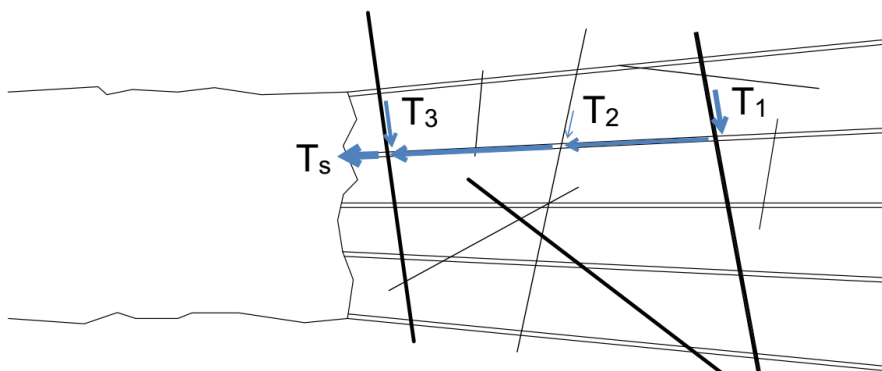
Kde L (m) je délka sekce, resp. délka vrtu a K (ms^{-1}) je koeficient hydraulické vodivosti, který představuje průměrnou hodnotu průtoku v prasklinách. Ke stanovení koeficientu hydraulické vodivosti jsou používány čerpací či tlakové vodní zkoušky. Koeficient filtrace je dán vztahem:

$$K = \frac{Q}{L \cdot \Delta H} \cdot \left[\frac{1 + \ln\left(\frac{L}{D}\right)}{2\pi} \right] \approx \frac{Q}{L \cdot \Delta H}$$

Kde Q (m^3/s) je průtok, L (m) délka vrtu, ΔH změna tlaku, vyjádřena poklesem výšky vodního sloupce a D (m) průměr vrtu. Zjednodušení je platné pro vrty do délky 10 m.

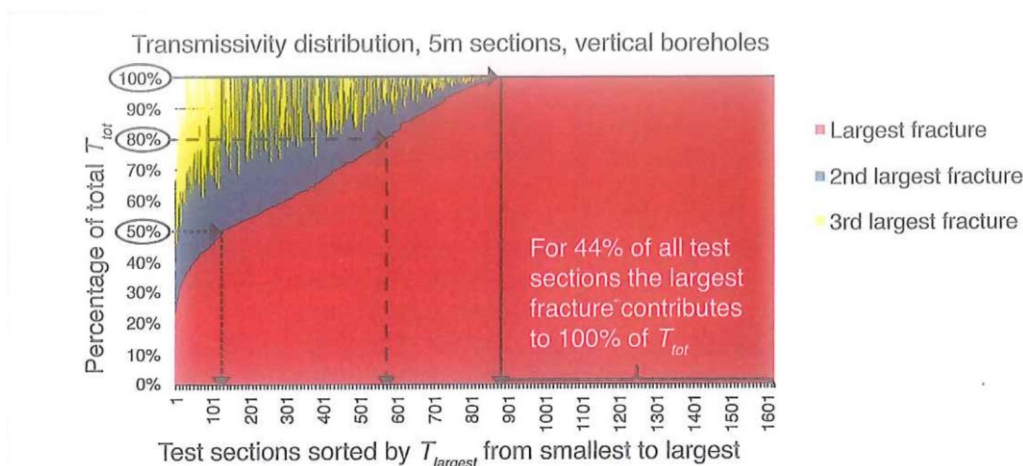
Proudění vody může být také analyzováno z pohledu jednotlivých prasklin, kdy transmisivita zkoumané sekce odpovídá představě paralelního uskupení prasklin (obr. 10) a je tedy sumou průtočnosti všech nekomunikujících, vodu vedoucích prasklin v této sekci.

$$T_s = \sum_{i=1}^n T_{f,i}$$



Obr. 10 paralelní uskupení prasklin. Zdroj Zdroj [autor AutoCAD 2019]

Tímto pohledem se zabýval v roce 2014 Hernquist a kolektiv a svou studií potvrdili předpoklad, že pouze několik prasklin vede většinu vody, kdežto většina prasklin pouze zanedbatelné množství, viz obr. 11. Toto odpovídá principům Paretova diagramu. Komplexní interakce mezi prouděním v jednotlivých prasklinách a nejistoty v odhadu počtu vodivých prasklin činí z toho přístupu velice složitý problém. Proto je využití znalosti průtočnosti sekcí praktičtější. [4, 5, 6]



Obr. 11 rozložení transmisivity prasklin (od nejmenší po největší) měřené v 5m úsecích vertikálního vrtu, Hernquist a kolektiv (2014). Zdroj [4]

4.2 Šíření injekční směsi v prasklinách

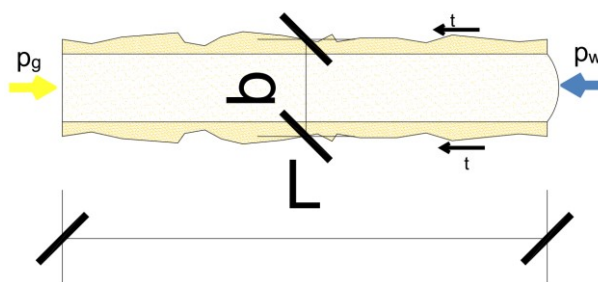
Šíření injekční směsi v bezporézních skalních horninách je komplexní problém s mnohými neznámými. Zjednodušeně se dá hovořit o vztahu reologických vlastností injekčního média, geometrii prasklin a provádění injekčních prací, jež mají na prostupování směsi masívem největší vliv.

Ve Skandinávii jsou nejčastěji používané cementové suspenze, které svými vlastnostmi odpovídají chování Binghamovy tekutiny. K jejich rozpohybování je tedy potřeba překonat hranici počátečního smykového napětí τ_0 (dynamická mez toku), které je také závislé na viskozitě μ směsi. Toto smykové napětí je dáno vztahem:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \frac{dv}{dz}$$

Kde $\frac{dv}{dz}$ je gradient rychlosti. Tečení směsi bude probíhat v jejím středu, jelikož na jejím obvodě, tedy kontaktu se skalním povrchem, je smykové napětí menší než dynamická mez toku τ_0 , viz obr. 12. Podobně, jako v případě šíření vody bude mít na šíření injekční směsi vliv šířka

praskliny. V případě vody je pro šíření směsi rozhodující tzv. hydraulická šířka b_h praskliny, avšak v případě cementové suspenze je to světlá šířka praskliny b .



Obr. 12 tečení směsi v prasklině, p_g je tlak injekční směsi, p_w tlak vody a τ smykové napětí. Zdroj [autor AutoCAD 2019]

Injekční práce mohou být provedeny dvěma způsoby, a to za konstantního tlaku P nebo konstantního průtoku Q :

1. $P = \text{konst.}$
2. $Q = \text{konst.}$

Probíhá-li injektáž za konstantního tlaku, dochází postupně ke snižování průtoku. Naopak, aby mohl být zajištěn konstantní průtok, musí být postupně zvyšován tlak na injekční směs. Tento přístup skýtá rizika spojená s odhadem limitního tlaku, který hornina přenese, aniž by došlo k hydraulickému rozpínání prasklin. Podobné zkušenosti popisuje v knize Injektování hornin a výstavba pozemních děl i J. Verfel. [8]

Konzervativní metoda konstantního tlaku je aplikovaná také na projektu FSE209, a proto další popis šíření injekční směsi bude vycházet z jejího principu. Tlak, potřebný k šíření injekční směsi v prasklinách, se nazývá efektivní injekční tlak Δp a je dán vztahem:

$$\Delta p = p_g - p_w$$

Jedná se o rozdíl mezi tlakem injekční směsi, p_g , a tlakem podzemní vody p_w . Penetrační délka I , nebo-li dosah injekční směsi, je přímo úměrná velikosti praskliny a efektivního injektážního tlaku. Významnou roli zde hraje také dynamická mez toku, jež musí být překonána, aby došlo k tečení cementové suspenze. Penetrační délka je dána vztahem:

$$I_{max} = \left(\frac{\Delta p}{\tau_0} \right) \cdot b$$

Další důležitou veličinou, která má vliv na penetrační délku injekční směsi je doba

trvání injekece. Vliv času na injekeční práce byl nejdříve vyřešen numericky v roce 1991 panem Hässlerem. Analytické řešení publikovali Gustafson a Stille v roce 2013. Jejich řešení spočívá v zavedení relativní injekeční doby t_d a relativní penetrační délky I_D . Relativní čas injekece je dán vztahem:

$$t_D = \frac{t}{t_0}$$

Kde t je skutečná doba injekece a t_0 charakteristická doba injekece dána vztahem:

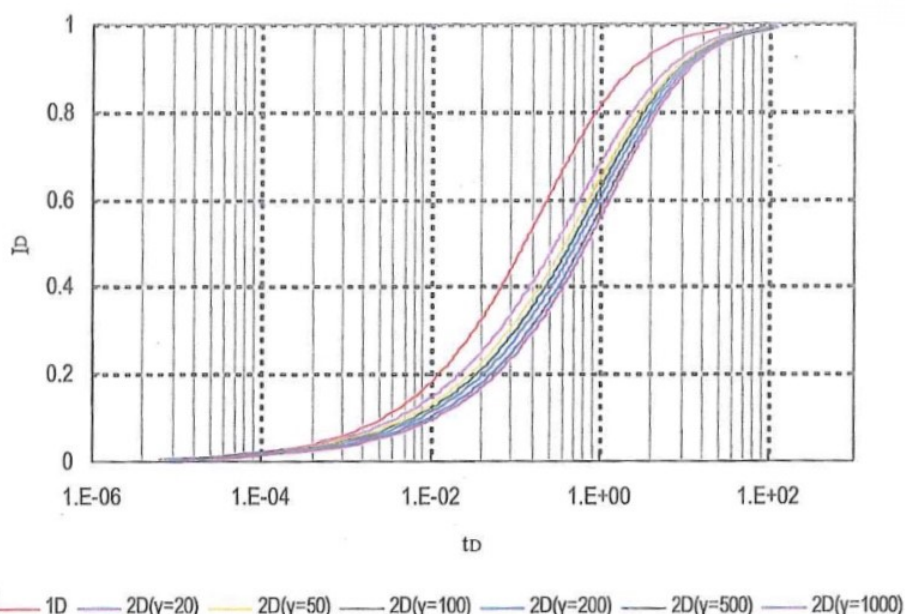
$$t_0 = \frac{6\Delta p \cdot \mu_g}{\tau^2}$$

Kde μ_g představuje viskozitu injekeční směsi. Relativní penetrační délka I_D je poměr mezi skutečně dosaženou penetrační délkou I a maximální teoretickou penetrační délkou směsi I_{max} . Je rovna:

$$I_d = \frac{I}{I_{max}}$$

Výsledky analytického řešení Gustafsona a Stilleho znázorněné na obr. 13 vedou k zajímavým závěrům:

- Relativní penetrační délka I_d není závislá na šířce praskliny b , nýbrž na relativním času t_d .
- Časový rozměr je funkcí efektivního tlaku injekece Δp a reologických vlastností injekeční směsi a je tedy klíčovým parametrem pro projekt injekečních prací
- 60-80 % penetrační délky je dosaženo během času t_0 ($t_D=1$)
- Po dosažení 40 % relativní penetrační délky I_D je šíření injekeční směsi natolik zpomaleno, že není praktické pokračovat dále



Obr. 13 relativní penetrační délka I_D jako funkce relativního času injektáže t_D znázorněna v logaritmickém měřítku, Gustafson a Stille (2005). Zdroj [4]

Dalšími veličinami, které jsou z pohledu návrhu injekčních prací zajímavé, a to zejména pro zavedení tzv. stop kritérií, jsou objem V (l) a průtok Q (l/min). Pro případ liniového proudění 1D, je objem V , přímo úměrný ploše profilu praskliny a penetrační délce. Platí pro něj vztah:

$$V = I \cdot b \cdot w = I_D \cdot I_{max} \cdot b \cdot w = I_d \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) w \cdot b^2$$

Pro skupinu prasklin bude totální objem V_{tot} sumou objemů V dílčích prasklin.

$$V_{tot} = \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \sum w \cdot b^2$$

Průtok Q získáme derivací totálního objemu V_{tot} podle času t .

$$Q = \frac{dV_{tot}}{dt} = \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \sum w \cdot b^2$$

Pro případ plošného proudění 2D platí následující vztahy:

$$V = \pi I^2 \cdot b = \pi (I_d \cdot I_{max})^2 \cdot b = \pi I_d^2 \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2 \cdot b^3$$

$$V_{tot} = \pi I_d^2 \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2 \sum b^3$$

$$Q = \frac{dV_{tot}}{dt} = 2\pi \cdot I_d \cdot \frac{dI_d}{dt_d} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \sum b^3$$

Na základě výše uvedené teorie a praktického ověření platnosti vztahů, byly stanoveny přibližné vztahy, mezi zmiňovanými parametry, ovlivňující penetrační délku injekční směsi, viz tabulka 4. [4, 5, 6]

	Šířka praskliny b	Tlak P	Viskozita μ_g	Mez toku τ_0	Čas k dosažení I t	Průtok k dosažení I Q
Výchozí stav	b	P	μ_g	τ_0	t	Q
2p	b	2P	μ_g	τ_0	0,5t	2Q
0,5 μ_g	b	P	0,5 μ_g	τ_0	0,5t	2Q
3 τ_0	b	P	μ_g	3 τ_0	1,1t	Q
2b	2b	P	μ_g	τ_0	0,2t	10Q

Tab. 4 vliv základních parametrů na čas potřebný k dosažení požadované penetrační délky. Zdroj [4]

4.3 Vlastnosti injekčních směsí na bázi cementu

Tyto injekční směsi, používané pro injektování prasklin ve skalních horninách, jsou nestabilní suspenze s vlastnostmi Binghamovy kapaliny. Mezi reologické vlastnosti cementových suspenzí, které mají rozhodující vliv na šíření směsi v horninovém prostředí patří zejména viskozita a dynamická mez toku. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny celou řadou faktorů, mezi něž patří např. typ cementu, jeho stáří, vodní součinitel směsi, aditiva, teplota nebo doba míchání. Ve skandinávské praxi se využívá portlandského cementu s d_{95} od 12 μm do 128 μm a superplastifikátor. Vodní součinitel se běžně pohybuje od 0,65 do 1,2, v závislosti na požadavcích injekčních prací a charakteru prostředí.

K ověření viskozity a dynamické meze toku se v laboratorních podmínkách využívá přesných měření pomocí reometru. V polních podmínkách se spoléhá na Marshův průtokový viskozimetr. Jedná se o snadný test, kdy se do Marshova kužele nalévá přes síto 1,5 l suspenze. Po naplnění se uvolní spodní uzávěr, standardně o velikosti 4,67 mm a měří se čas vytečení

právě 1 l směsi. Voda by měla tímto průtokovým viskozimetrem protéct za 28 vteřin. Doba potřebná k protečení určitého množství suspenze je tak závislá především na viskozitě, hustotě směsi a dynamické mezi toku.

Penetrabilita cementových suspenzí je závislá na velikosti cementového zrna a velikosti šířky praskliny, nicméně u jemnozrnných cementů je vztah mezi nimi komplexním problémem. Na základě studie Ericssona a Stilleho z roku 2003 byly popsány základy, procesů spojených s průchodností suspenzí z jemnozrnných cementů. K tomuto účelu byl vyvinut přístroj zvaný „filtr pumpa“, pomocí kterého lze stanovit limitní šířku praskliny b_{min} , kterou směs již není schopna projít. Dále lze zjistit takovou šířku praskliny b_{krit} , u které ještě nedochází k zadržování cementových zrn a směs je schopna jí volně proudit. Lze tedy najít interval šířky praskliny, nacházející se mezi b_{min} a b_{krit} , ve kterém bude docházet k zadržování cementových zrn a postupné tvorbě cementové ucpávky. „Filtr puma“ je pumpa o obsahu 320 ml, obr. 14. Na jejím konci je osazen filtr požadované velikosti ok, obvykle 45 až 120 μm , přes který je do pumpy nasáta injekční směs. Nasátý obsah je následně vyprázdněn do odměrného válce, čímž je možné stanovit kolik směsi je schopno projít filtrem určité hustoty ok. Tento nástroj je třeba po každém měření opravdu důkladně vyčistit, jinak dochází k zanesení těla pumpy a získat pak relevantní hodnoty měření je obtížné.



Obr. 14 filtr pumpa ke stanovení b_{min} . Zdroj [autor foto]

Jelikož jsou cementové suspenze nestabilní injekční směsi, je pro ně typický jev zvaný separace vody. Je-li suspenze ponechána v klidu, začne docházet k sedimentaci cementových zrn a následně k jejich konsolidaci. Standardně se separace vody zjišťuje v kalibrovaných válcích výšky 300 mm, ve kterých se sleduje odstoje vody v čase. Akceptovatelná míra separace je do 5 % za 2 hodiny. Studie Draganoviče z roku 2009 prokázala, že míra sedimentace je závislá na kvadrátu výšky vzorku. Na vzorcích s malou výškou bylo vysledováno, že sedimentace, a tedy separace vody proběhne rychle. V případě prasklin tento proces proběhne ještě během injektáže a předpokládá se, že prostor, který vznikl separací vody bude alespoň částečně vyplněn. Separace vody se dá kontrolovat vodním součinitelem směsi. [4, 5, 6]

4.4 Injekční směsi používané na projektu FSE209

Požadavky na vlastnosti injekční směsi jsou zadány v projektové dokumentaci. Ta hovoří o třech suspenzích na bázi cementu a minerální injekční směsi, kterou je koloidní silikagel. V případě extrémních přítoků bude použita chemická injektáž. Primárně jsou však používány cementové suspenze.

Cementové injekční směsi jsou předepsány celkem tři, přičemž je projektovou dokumentací určeno v jakých úsecích tunelu se bude používat směs 1, 2 nebo 3. Požadavky na vlastnosti směsí uvádí tabulka 5.

Type směsi	Směs 1	Směs 2	Směs 3
$b_{krit} (\mu m)$	<75	<90	<140
$b_{min} (\mu m)$	<45	<45	<90
$\tau_0 (Pa)$	1-2	2-6	>8
$\mu_g (Pas)$	10-30	10-50	>30

Tab. 5 požadované vlastnosti cementových injekčních směsí na projektu FSE209. Zdroj [10]

Na trhu je mnoho produktů, ze kterých je možno vybírat, avšak rozdíly mezi nimi mohou být zásadní. Velmi často jsou proklamované vlastnosti cementových produktů v polních podmínkách nedosažitelné. Proto volbě cementu předchází důkladné testování přímo na místě stavby. V současné době se na projektu FSE209 k injekčním pracem využívají cementové suspenze z portlandského cementu zvaného INJ30 dodavatele Cementa (specifická plocha zrn $1355 \text{ m}^2/\text{kg}$) a superplastifikátoru iFlow od výrobce Sika. Právě společnost Sika provedla na stavbě otestování svých receptur injekčních směsí dle požadavků projektové dokumentace. Přehled dávkování jednotlivých komponentů a výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 6.

PŘEHLED RECEPTUR A VÝSLEDKŮ TESTOVÁNÍ CEMENTOVÝCH SUSPENZÍ Z CEMENTU INJ30 + iFlow			
Typ směsi	1	2	3
Cement	Inj30	Inj30	Inj30
Vodní součinitel	0,85	0,7	0,6
iFlow-1 [% bwoc]	0,2	0,2	-
Teplota směsi	Měření 1, 2 a 3	Měření 1, 2 a 3	Měření 1 a 2
Teplota [°C]	21,1 / 21,2 / 19,2	19,5 / 21,0 / 20,7	19,2 / 21,0
Hustota směsi (mud balance)			
hustota [kg/dm³]	1,49 / 1,50 / 1,55	1,68 / 1,66 / 1,67	1,68 / 1,66
Penetrabilita (filterpump)			
Filtr 45 µm [ml]	3/2/4	2/4/3	neměřeno
Filtr 63 µm [ml]	20/98/50	18/18/20	neměřeno
Filtr 75 µm [ml]	300/300/300	270/300/300	neměřeno
Filtr 90 µm [ml]	300/300/300	300/300/300	neměřeno
Filtr 100 µm [ml]	300/300/300	300/300/300	neměřeno
Filtr 120 µm [ml]	300/300/300	300/300/300	neměřeno
b _{min} [µm]	< 45	< 45	neměřeno
b _{krit} [µm]	< 75	< 75 resp. < 90	neměřeno
Penetrabilita (filterpress)			
Filtr 43 µm [ml]	5/10/5	5/5/5	3/3
Filtr 62 µm [ml]	15/30/15	5/10/10	neměřeno
Filtr 77 µm [ml]	740/>1000/>1000	750/980/900	neměřeno
Filtr 91 µm [ml]	>1000/>1000/>1000	>1000/>1000/>1000	670/650
Filtr 104 µm [ml]	>1000/>1000/>1000	>1000/>1000/>1000	neměřeno
Filtr 122 µm [ml]	>1000/>1000/>1000	>1000/>1000/>1000	1000/750
b _{min} [µm]	< 43	< 43	< 43
b _{krit} [µm]	< 77 resp. < 91	< 91	< 122
Nepřímé měření reologie (Marshův viskozimetr)			
Čas průtoku 1l směsi t=0 [s]	37,5 / 33,0 / 33,5	41,0 / 41,0 / 39,0	43,5 / 51,5
Reologie			
Viskozita (reometer) [mPa·s]	12 / 4 / 9	10 / 12 / 12	99 / 147
Dynamická mez toku (reometer) [Pa]	2,28 / 0,95 / 2,02	2,52 / 2,16 / 2,50	6,20 / 7,01
Separace vody			
po 120 min [%]	4 / 11 / 10	9,0 / 5,0 / 2,0	1,0 (90 min) / -
*bwoc znamená, že procento aditiva je odvozeno z váhy cementu			

Tab. 6 vlastnosti injekčních směsí 1, 2 a 3 INJ30 a superplatifikátoru iFlow. Zdroj [výrobní dokumentace SBT Sverige AB]

4.5 Provádění injekčních prací na projektu FSE209

Vrtání vrtů těsnící clony se provádí pomocí vrtacích vozů Atlas Copco WE3 (obr. 15). Vrtné vozy musí být vybaveny softwarem pro sběr tzv. MVD dat (Measurement while drilling), která jsou využívána k posouzení kvality skalního masívu a následnému upřesnění počtu vrtů vějíře těsnící clony. Mezi MWD data patří rychlost otáček vrtání, tlak na vrtné kladivo, rychlost postupu vrtání, průtok výplachu, tlak výplachu, hloubka vrtu a čas. Vrtání probíhá poloautomaticky, dle vrtného plánu unikátního pro každou injektážní clonu.



Obr. 15 Vrtací vůz Atlas Copco WE3 a injektážní stanice Unigrout Smart M4 na kolovém podvozku. Zdroj [výrobní dokumentace SBT Sverige AB]

K injektáži se na projektu využívá injektážní stanice Atlas Copco Unigrout Smart M2 a AMW Grouting system M4 na kolovém podvozku. Injektážní stanice musí mít minimální kapacitu 70 l/min, být schopna vyvinout tlak 5 MPa a v neposlední řadě být vybavena softwarem pro automatický záznam klíčových údajů, kterými jsou doba injektáže t , objem spotřebované injekční směsi V , tlak P a průtok Q . Unigrout M2 umožňuje injektovat dva vrtů současně, kdežto AMW Grouting system M4 čtyři, což umožňuje zkrátit celkovou dobu provádění injekčních prací na polovinu.

K této činnosti je zapotřebí třech pracovníků, kde jeden obsluhuje injektážní stanici a vyhodnocuje průběh injektáže, přičemž zbylí dva v čelbě přemísťují hadice do nezainjektovaných vrtů. Operátor injektážní stanice se během injektáže řídí zadanými stop kritérii, která vychází z projektu injekčních prací. Injektáž podléhá následujícím kritériím:

- Injekční práce budou probíhat po dobu 15 min po dosažení předepsaného efektivního injekčního tlaku
- Pokud je průtok menší než 2 l/min po dobu 5 min po dosažení efektivního injekčního tlaku může být injektáž ukončena
- Injektáž bude ukončena pokud injektovaný objem jednoho vrtu dosáhne 500 l

Během injecktáže je nutné průběžně ověřovat vlastnosti namíchané směsi. Provádí se tři základní měření. Mudbalance test pro ověření hustoty, filtrpump test s filtrem 90 μm pro ověření b_{krit} a zkouška Marchovým viskozimetrem pro ověření viskozit, viz obr. 16.



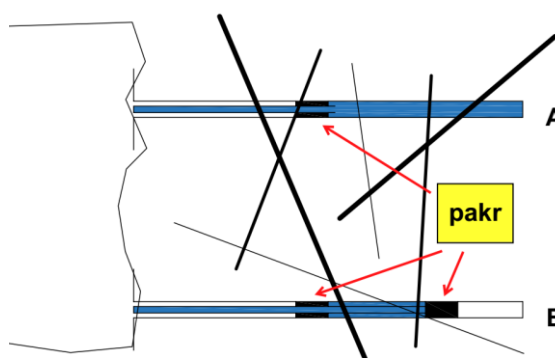
Obr. 16 zkušební sada pro ověření vlastností injeckčních směsí během injecktáže (Marshův viskozimetr, filtr pumpa s filtrem 90 μm a mud balance test). Zdroj [autor foto]

5 Ověření účinků a vlastností směsi těsnící injektáže

5.1 Způsoby ověřování účinků těsnící injektáže

Vzhledem k heterogennímu charakteru horninového prostředí se systémem těžko zmapovatelných prasklin a puklin, je kontrola injekčních prací velmi obtížná. K ověření těsnosti masivů se nejčastěji využívá průzkumných nebo kontrolních vrtů, ve kterých se měří přítoky nebo ztráty vody během vodních čerpacích či tlakových zkoušek. Mezi další způsoby kontroly patří například značkování injekční směsi či karotáž. [8]

Vodní tlakové zkoušky patří mezi hydrodynamické zkoušky. Tato zkouška se také nazývá Lugeon test a spočívá ve vtlačování vody do vrtu v celé jeho délce (obr. 17-A) nebo pouze v určitém úseku (obr. 17-B), a to při konstantním tlaku. Během zkoušky se měří množství vtlačené vody, resp. ztráta vody, za určitý časový interval. Lugeon test se tedy dá definovat jako objem ztracené vody (l), v úseku jednoho metru vrtu (m), při tlaku 1 MPa za jednu minutu (Lugeon = $l/min, m, MPa$). Klasifikace hodnoty Lugeonu je uvedena v tabulce. 7. Na základě spotřeby vody (l/min), hodnoty tlaku (MPa) a geometrie vrtu (m) je také možné odvodit hydraulické vlastnosti prostředí, jako jsou transmisivita či hydraulická vodivost. [4, 5, 6]



Obr. 17 A – vodní tlaková zkouška v celé délce vrtu za využití jednoho pakru, B – vodní tlaková zkouška v úseku vrtu ohraničeného dvojicí pakrů. Zdroj [autor AutoCAD 2019]

Lugeon	Klasifikace hodnoty	Koeficient hydraulické vodivosti	Klasifikace horninového prostředí a diskontinuit
<1	Velmi nízká	$<1 \times 10^{-5}$	velmi těsné
1-5	Nízká	$1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	Těsné
5-15	Mírná	$6 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$	pár otevřených prasklin
15-50	Střední	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$	Několik otevřených prasklin
50-100	Vysoká	$6 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	Mnoho otevřených prasklin
>100	Velmi vysoká	$>1 \times 10^{-3}$	Vysoká koncentrace prasklin a volných prostor

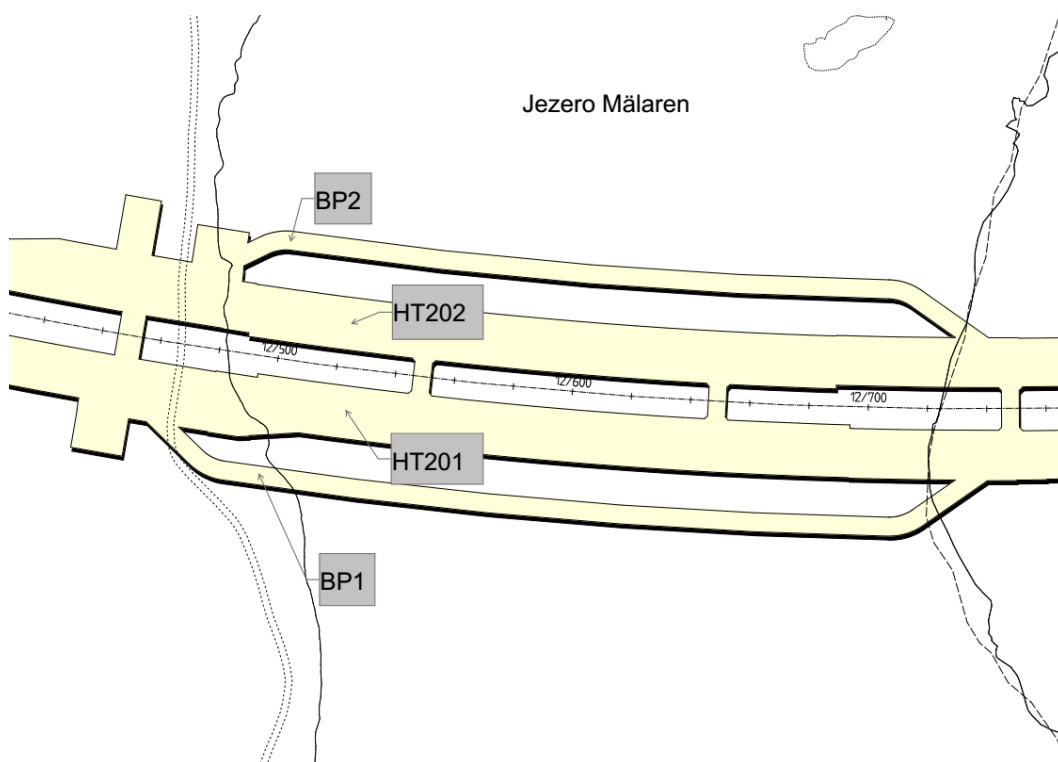
Tab. 7 interpretace Lugeon testu. Zdroj [5]

Značkování injekční směsi spočívá v obarvení směsi, pomocí barviva, zajišťujícího snadné rozeznání směsi od injektovaného prostředí. Tímto způsobem lze vizuálně ověřit šíření směsi v prasklinách a zejména pak skutečnou penetrační délku, což je vhodné pro ověření celého projektu injekčních prací a definovaná stop kritéria. V podzemním stavitelství se obvykle využívá fluorescentních barviv eozin a rhodamin. Po nasvícení UV světlem je přítomnost barviva jasně patrná.

Karotáž je geofyzikální průzkumná metoda, prováděná přímo ve zkušebních vrtech. Jedná se o měření elektrického odporu prostředí, který bude různý pro proinjektované okolí vrtu a oblast za dosahem injektáže, kde se bude vyskytovat voda. Tato metoda je vhodná do porézního prostředí.

5.2 Způsob a metodika ověřování účinků těsnící injektáže na projektu FSE209

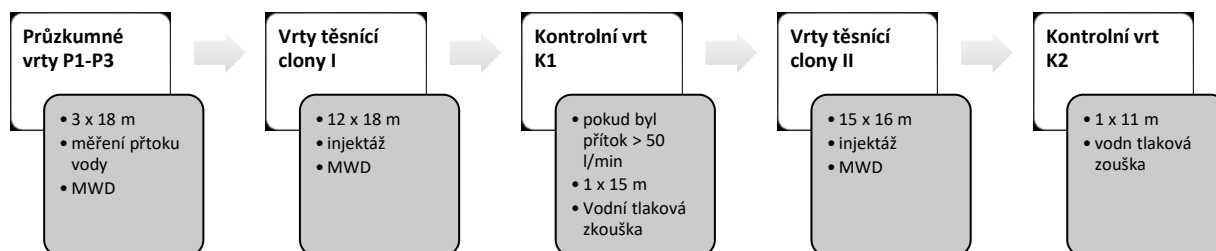
Pro zkoumání účinků těsnící injektáže na projektu FSE209 byl zvolen úsek mezi staničením km 12/500 až km 12/700, procházející pod jezerem Mälaren, kde jsou na základě dodatečného průzkumu, provedeného v prosinci 2017, očekávány složité geologické podmínky a také zvýšené přítoky vody. V úseku pod jezerem budou vyražena dvě menší provizorní průzkumná díla, s profilem 80 m² a dva tunely hlavní trasy, profilu až 190 m² (obr. 18).



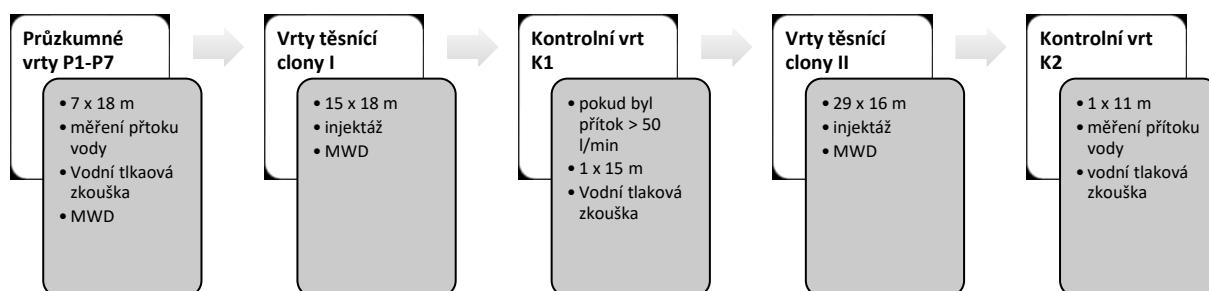
Obr. 18 tunely hlavní trasy HT201 a HT202 a provizorní díla BP1 a BP2 v pasáži pod jezerem Mälaren. Zdroj [autor AutoCAD 2019]

Metodika ověřování účinků těsnicí injektáže spočívá v ověření hydraulických vlastností horninového prostředí před a po provedení injekčních prací, přičemž rozsah zkoušek se mírně liší v průzkumných dílech a v hlavních tunelech, jak je znázorněno na obrázku 19. Zkoušky zvolené pro stanovení hydraulických vlastností byly vybrány zejména s ohledem na dostupnost potřebného vybavení a minimálního narušení produkčního cyklu.

METODIKA ZKOUŠEK V PRŮZKUMNÝCH DÍLECH



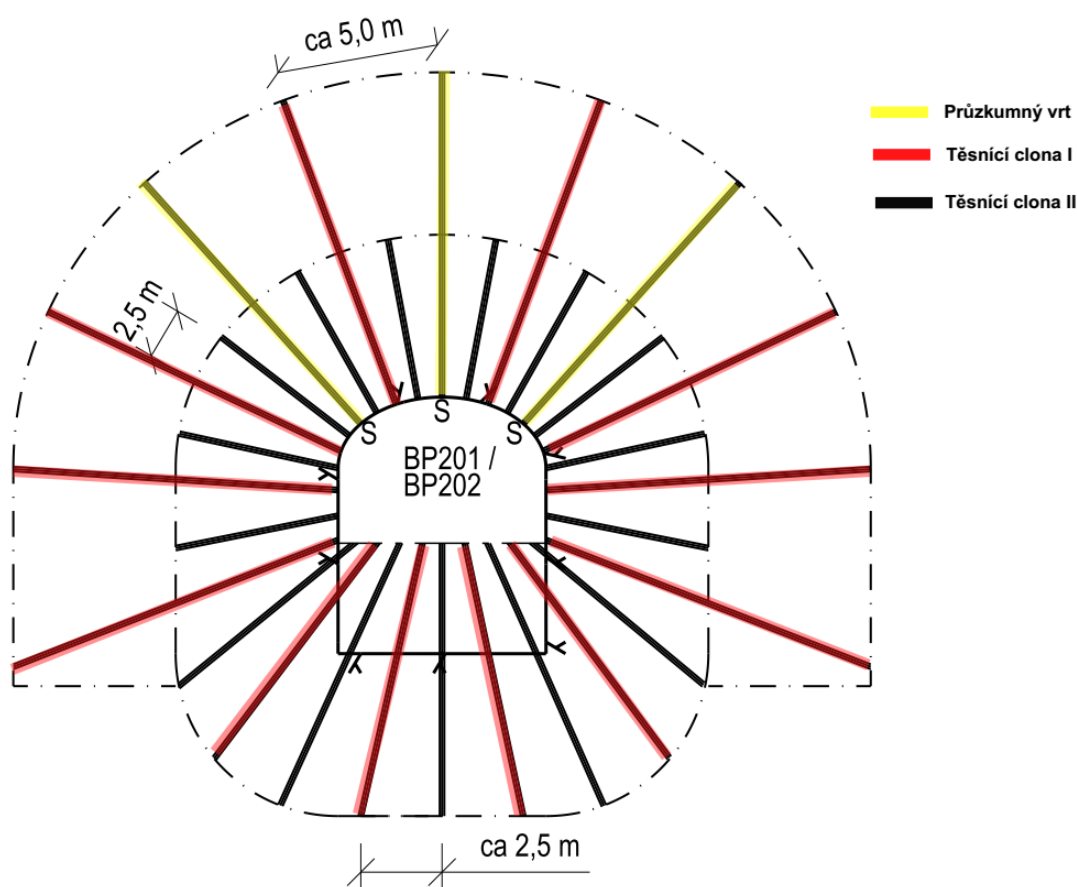
METODIKA ZKOUŠEK V HLAVNÍCH TUNELECH



Obr. 19 metodika ověřování účinků těsnicí injektáže v provizorních tunelech a tunelech hlavní trasy. Zdroj [autor]

V případě průzkumných tunelů vše začíná navrtáním třech průzkumných vrtů do stropu kaloty, ukloněných o 40° od osy díla, dlouhých 18 m. Vrty zasahují na svém konci 10 m za obrys díla (obr. 20). Tyto vrty jsou vrtány přes uzavíratelné ventily, které jsou osazené 2 m hluboko do průzkumného vrtu. Tyto ventily se v případě extrémního průtoku uzavřou a zabrání zaplavení tunelu. Následně se provede měření průtoku vody ve všech třech vrtech. Pokud bude zaznamenán průtok z jednoho vrtu větší než 50 l/min, bude po dokončení prvního kola injektáže navrtán 15 m hluboký kontrolní vrt K1, pro vodní tlakovou zkoušku. Tento vrt bude umístěn v blízkosti vrtu těsnicí clony, který během injektáže pojmul největší množství injekční směsi. Na základě výsledků zkoušky provedené v kontrolní vrtu může být navrtán doplňující vějíř těsnicí clony (pokud bude $Lugeon > 1$). Poté co jsou známy průtoky vody z průzkumných vrtů se

pokračuje ve vrtání vrtů první těsnící clony a pak následuje samotná injektáž, jak je popsáno v kapitole 4.5. Dalším krokem je navrtání vrtů druhé těsnící clony, které jsou vrtány pod úhlem 25° , v délce 16 m. Tyto vrty zasahují na svém konci 5 m za obrys díla (obr. 20). Následné druhé kolo injektáží se obvykle provádí se směsí s vyšším vodním součinitelem, než bylo použito v prvním kole. Kontrola provedených injekčních prací se provádí vodní tlakovou zkouškou v kontrolním vrtu K2, vrtaného rovnoběžně s osou díla v délce 11 m. V případě velké spotřeby injekční směsi u několika vrtů, je provedeno kontrolních vrtů více. Pokud by zkouškou byl zjištěn $Lugeon > 0.2$ budou injekční práce pokračovat doplňující těsnící clonou. [10]



Obr. 20 Jednotlivé vějíře těsnící clony v případě průzkumných tunelů. Zdroj [10]

Celý proces je metodicky podobný i v tunelech hlavní trasy. Rozdíly jsou pouze v počtu průzkumných vrtů, v počtu vrtů první těsnící clony a počtu vrtů druhé těsnící clony. Stejně jako v případě průzkumných tunelů je dosah vrtů první těsnící clony 10 m a druhé 5 m za obrys díla. Navíc oproti průzkumným tunelům se v průzkumných vrtech hlavních tunelů provádí jak měření přítoku vody, tak vodní tlaková zkouška.

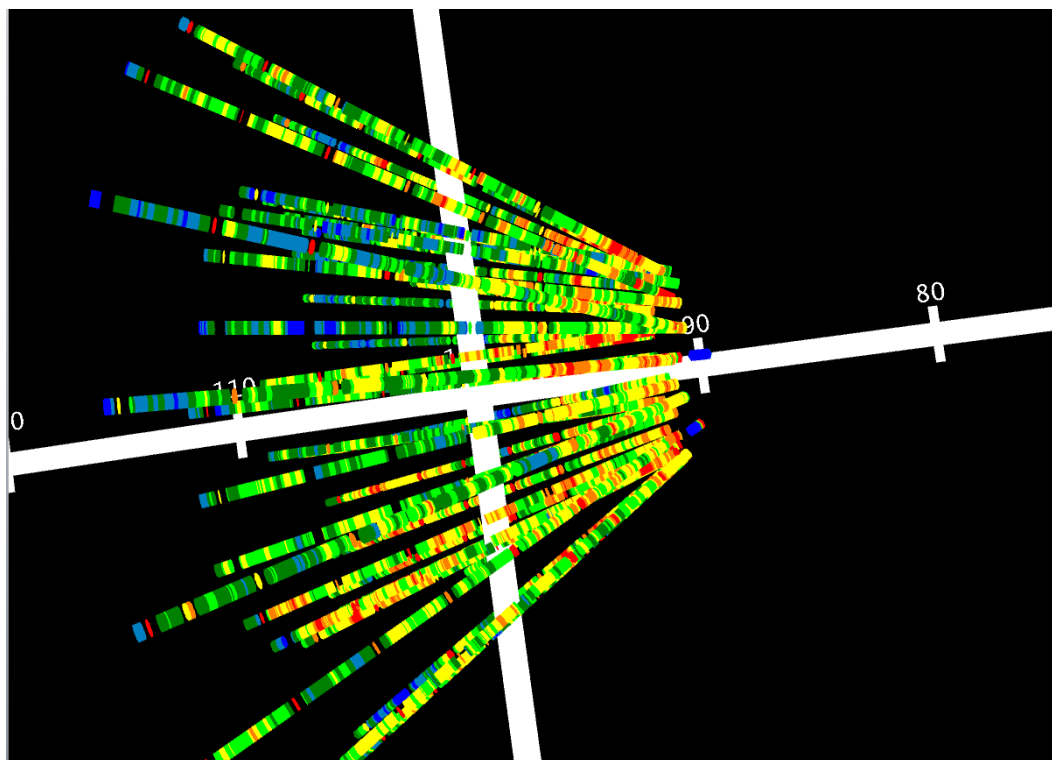
5.3 MWD data z průzkumných a injekčních vrtů v pasáži pod jezerem

Mälaren

Všechny vrty pro injekční práce jsou využívány jako doplňující podklad pro kvalitativní posouzení horninového prostředí. Na základě údajů o průběhu vrtání umí různé softwary, jako například Underground Manager od Atlas Copco či software společnosti Rockma, graficky prezentovat zaznamenané údaje. Tzv. digitální mapování je při razících pracích ve Skandinávii běžným nástrojem geologa, využívaným zejména pro umístění doplňujících vrtů pro injekční práce.

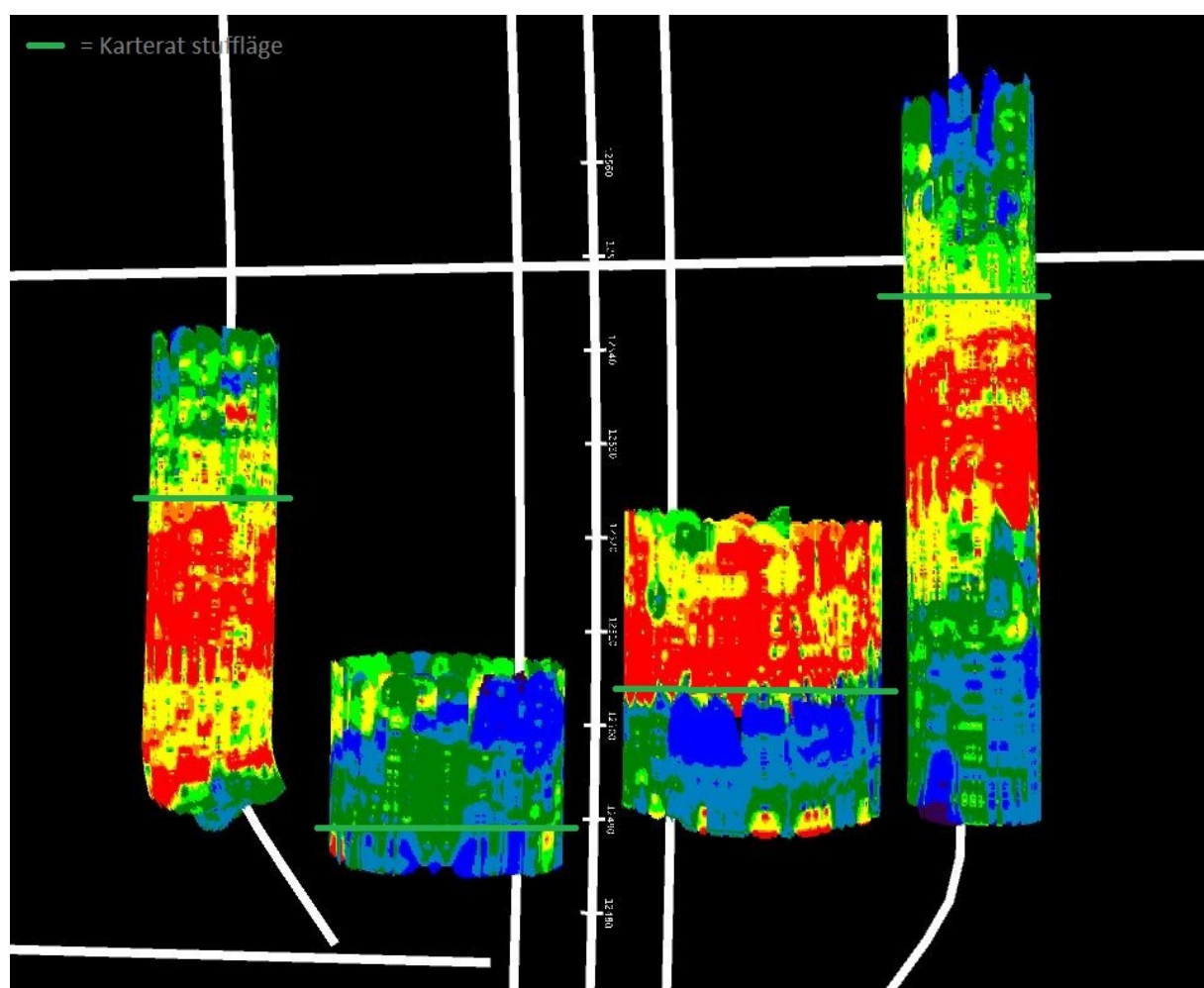
Ve zkoumané části pod jezerem bylo doposud navrtáno 11 kompletních těsnících clon, s celkem 522 vrty, souhrnné délky 12 100 m, které byly využity k digitálnímu mapování. Na obrázku 21 je ukázka jedné z možných grafických prezentací MWD dat. Jedná se o vrty první těsnící clony v průzkumném tunelu BP1, ve staničení km 0/092. Grafické zpracování MWD dat barevně odlišuje různou kvalitu horninového prostředí na škále barev od modré po červenou, kde modrá představuje zdravé skalní prostředí.

Z obrázku 21 je dále patrné převažující zelené až modré zbarvení, zejména za staničením km 0/095, což naznačuje, že horninové prostředí je kompaktní, s pouze lokálními diskontinuitami a dá se předpokládat, že injekční práce v těchto vrtech budou zejména o jejich vyplňování.



Obr. 21 grafická prezentace MWD dat z vrtání těsnící clony v BP1 ve staničení km 0/092. Zdroj [Björn Stille Rockma 2018]

Další varianta grafické prezentace MWD dat je vidět na obrázku 22, jehož podkladem jsou veškeré vrty, průzkumné i injekční, navrtané do konce října 2018. Z MWD dat je dobře patrná změna parametrů horninového prostředí ve všech čtyřech tunelech, přibližně ve staničení km 12/500 a km 12/540. Průzkumná díla BP1 a BP2, ražena v předstihu před tunely hlavní trasy, tak prokazatelně napomáhají předpovídat v jakém staničení bude změna horninového prostředí zastižena v tunelech hlavní trasy. Porovnáme-li obrázek 22 a níže uvedenou tabulku 8 poskytující stručný přehled o průběhu jednotlivých injekčních prací, budeme moci pozorovat větší spotřebu injekční směsi v místech, kde MWD data červenou barvou naznačují zónu oslabeného horninového prostředí.

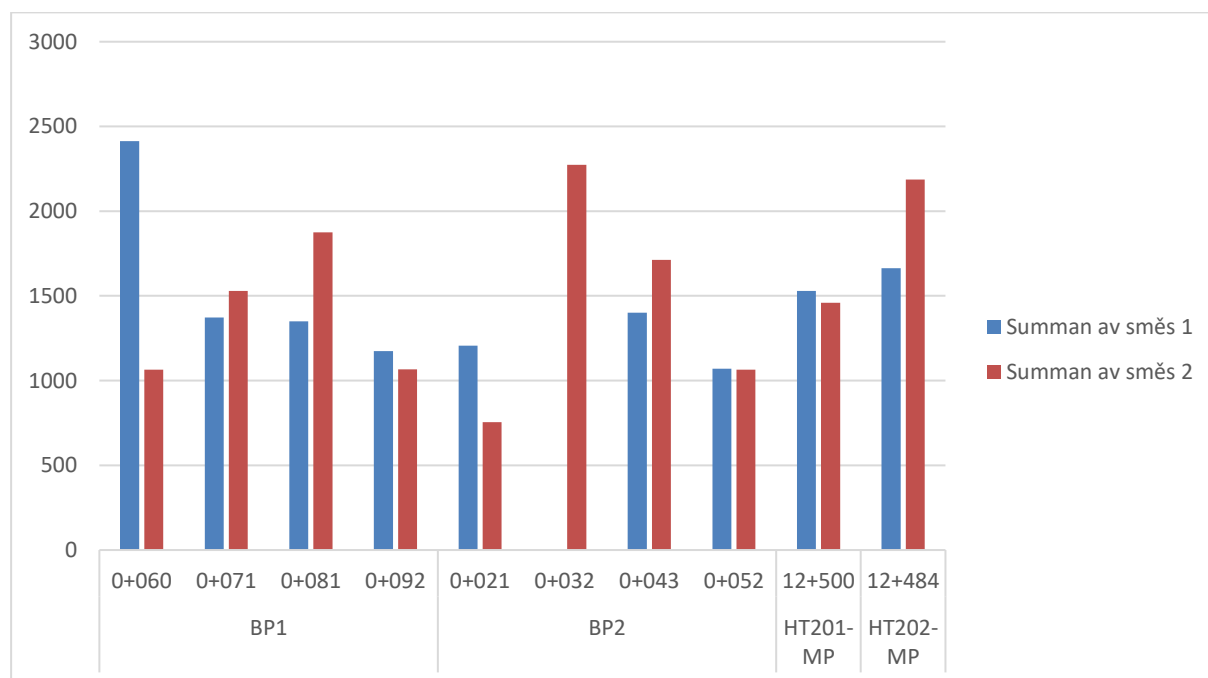


Obr. 22 grafická prezentace MWD dat všech vrtnů v pasáži pod jezerem Mälaren, tlustou čarou je naznačena pozice čelby v jednotlivých tunelech. Zdroj [Björn Stille Rockma 2018]

5.4 Injekční práce provedené v pasáži pod jezerem Mälaren

V období od června do listopadu 2018, byly provedeny těsnící injektáže předpolí, ve shodě s výše popsanou metodikou prací, v celkem jedenácti staničeních. Průběh injekčních prací v jednotlivých tunelech shrnuje graf 1 tabulka 8.

Nejpokročilejší je čelba v průzkumném tunelu BP1, kde bylo vyraženo přibližně 50 m. Provedeny zde byly celkem čtyři kompletní (dvoukolové) těsnící clony. Z tabulky 7 lze usuzovat, že v případě tohoto tunelu se jednalo spíše o vyplňování vrtů směsí. Pouze ve staničení km 0/066 a 0/081 byla spotřeba injekční směsi vyšší. Částečným důvodem byly problémy na zařízení a v několika případech také špatné uchycení pakrů, což způsobilo únik směsi zpět do tunelu a nikoli efektivní vyplňování prasklin. Podobný průběh injekčních prací lze sledovat v průzkumném tunelu BP2 a také hlavním tunelu HT202, kde spotřeby materiálu jen málo převyšují množství, potřebné pro vyplnění injekčních vrtů. V hlavním tunelu HT201 byly provedeny dvě kompletní těsnící clony. První ve staničení km 12/500 není z pohledu vyplňování prasklin nijak významná, avšak druhá ve staničení km 12/510 naznačuje, že hornivé prostředí za touto sekcí bude méně těsné a že došlo k průniku směsi do okolí injekčních vrtů.



graf 1 - spotřeba cementových směsí v jednotlivých případech injekčních prací. Ve stančení km 0/032 bylo chybně použito směsi 2 v obou kolech injektáže. Zdroj [autor]

PRŮZKUMNÝ TUNEL - BP1							
staničení	injektáž č.	počet vrtů	směs 1 VCR 0,95		směs 2 VCR 0,75		výplň prasklin cementem (kg)
			skutečná spotřeba cementu (kg)	vyplň vrtů cementem (kg)	skutečná spotřeba cementu (kg)	vyplň vrtů cementem (kg)	
0/066	1	16	-	-	1 065	698	367
	2	23	2 413	860	-	-	1 554
0/071	1	20	-	-	1 529	832	697
	2	23	1 313	863	-	-	450
0/081	1	20	-	-	1 874	864	1 010
	2	23	1 279	822	-	-	457
0/092	1	20	-	-	1 067	848	219
	2	23	1 152	798	-	-	354
PRŮZKUMNÝ TUNEL - BP2							
staničení	injektáž č.	počet vrtů	směs 1 VCR 0,95		směs 2 VCR 0,75		výplň prasklin cementem (kg)
			skutečná spotřeba cementu (kg)	vyplň vrtů cementem (kg)	skutečná spotřeba cementu (kg)	vyplň vrtů cementem (kg)	
0/021	1	16	-	-	755	662	93
	2	24	1 206	863	-	-	343
0/032	1	16	-	-	899	707	192
	2	22	-	-	1 285	915	370
0/043	1	21	-	-	1 713	929	784
	2	23	1 338	822	-	-	516
0/052	1	20	-	-	1 064	947	117
	2	23	1 034	822	-	-	212
HLAVNÍ TUNEL - HT201							
staničení	injektáž č.	počet vrtů	směs 1 VCR 0,95		směs 2 VCR 0,75		výplň prasklin cementem (kg)
			skutečná spotřeba cementu (kg)	vyplň vrtů cementem (kg)	skutečná spotřeba cementu (kg)	vyplň vrtů cementem (kg)	
12/500	1	29	-	-	1 460	1 373	87
	2	32	1 529	1 276	-	-	253
12/510	1	29	-	-	2 828	1 565	1 263
	2	35	2 379	1 368	-	-	1 011
HLAVNÍ TUNEL - HT202							
staničení	injektáž č.	počet vrtů	směs 1 VCR 0,95		směs 2 VCR 0,75		výplň prasklin cementem (kg)
			skutečná spotřeba cementu (kg)	vyplň vrtů cementem (kg)	skutečná spotřeba cementu (kg)	vyplň vrtů cementem (kg)	
12/484	1	31	-	-	2 186	1 624	562
	2	33	1 638	1 233	-	-	405

Tab. 8 stručný souhrn provedených injekčních prací ve zkoumaném úseku. Zdroj [výrobní dokumentace SBT Sverige AB]

5.5 Vlastní zkoušky a jejich výsledky

Součástí všech injekčních prací, uvedených v tabulce 8, byly vodní tlakové zkoušky a měření přítoků podzemní vody. Tato měření a zkoušky byly provedeny ve shodě s metodickým postupem, popsáním v kapitole 5.2.

V průzkumných tunelech BP1 a BP2 bylo provedeno 8 kompletních injektáží, přesně čtyři v každém tunelu. Samotným injekčním pracem předcházela měření přítoků vody v průzkumných vrtech P1, P2 a P3, která zaznamenala jen malé přítoky v průměru 0,2 l/min, indikující velice suché horninové prostředí viz tab. 9.

PRŮZKUMNÝ TUNEL - BP1				PRŮZKUMNÝ TUNEL - BP2			
staničení	přítok (l/min)			staničení	přítok (l/min)		
	vrt P1	vrt P2	vrt P3		vrt P1	vrt P2	vrt P3
0/066	0,20	0,10	0,05	0/021	0,10	0,05	0,05
0/071	0,33	0,52	0,40	0/032	0,05	0,00	0,02
0/081	0,14	0,06	0,01	0/043	0,20	0,45	0,30
0/092	0,00	0,10	0,15	0/052	0,20	0,20	0,40

Tab. 9 přehled výsledků měření přítoků vody v průzkumných tunelech BP1 a BP2. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]

Jelikož ani jednou nenastala situace, kdy by byl v průzkumném vrtu naměřen přítok větší než 50 l/min, kontrolní vrt K1, kterým by byl ověřen účinek prvního kola těsnící clony nebyl zapotřebí. Po dokončení druhého kola těsnící clony byl navrtán kontrolní vrt K2 a v něm provedena vodní tlaková zkouška, viz obr. 17-A. Měřena byla ztráta vody v celé délce kontrolního vrtu, vyjádřena jednotkou Lugeon. Měření probíhá pro dobu dvou minut, poté co bylo ve vrtu dosaženo konstantního tlaku 1,4 MPa, tedy o 1 MPa více, než je teoretický tlak podzemní vody v tomto staničení. Z průběhu zkoušek (tab. 10 a 11) je vidět, že ztráty vody byly velice malé a hodnoty Lugeonu se pohybují do 0,26.

PRŮZKUMNÝ TUNEL - BP1						
staničení	čas (min)	objem vody (l)	tlak (MPa)	efektivní tlak (MPa)	délka sekce (m)	Lugeon (l/(min*m*MPa))
0/066	2	0,2	1,4	1	11	0,01
0/071	2	5,1	1,4	1	10	0,26
0/081	2	0	1,4	1	9	0,00
0/092	2	1,7	1,4	1	9	0,09

Tab. 10 přehled výsledků vodních tlakových zkoušek v průzkumném tunelu BP1. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]

PRŮZKUMNÝ TUNEL - BP2						
staničení	čas (min)	objem vody (l)	tlak (MPa)	efektivní tlak (MPa)	délka sekce (m)	Lugeon (l/(min*m*MPa))
0/021	2	1,2	1,4	1	10	0,06
0/032	2	0,5	1,4	1	10	0,03
0/043	2	0,2	1,4	1	9	0,01
0/052	2	0	1,4	1	10	0,00

Tab. 11 přehled výsledků vodních tlakových zkoušek v průzkumném tunelu BP2. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]

V hlavních tunelech, zejména díky náročné technologii, ražby nepokročily v úseku pod jezerem příliš daleko. V hlavním tunelu HT201 proběhly dvě kompletní injektáže a v hlavním tunelu HT202 jedna.

Přítoky vody byly měřeny pokaždé v sedmi průzkumných vrtech v obryse díla před zahájením injekčních prací a následně v kontrolním vrtu K2 po ukončení druhého kola injekčních prací. Kontrolní vrt K1 nebyl využit, vzhledem k malým přítokům naměřeným v průzkumných vrtech. Ve většině průzkumných vrtů byly naměřeny zanedbatelné přítoky, viz tabulka 12 a 13. Pouze v hlavním tunelu HT201, ve staničení km 12/500, v průzkumných vrtech P6 a P7 byl zaznamenán přítok okolo třech litrů za minutu, přičemž tyto vrty se nacházejí v počvě tunelu.

HLAVNÍ TUNEL - HT201								
staničení	přítok (l/min)							
	vrt P1	vrt P2	vrt P3	vrt P4	vrt P5	vrt P6	vrt P7	K2
12/500	0	0	0,4	0	0,1	3	3,5	0,1
12/510	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 12 přehled výsledků měření přítoku vody v hlavním tunelu HT201. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]

HLAVNÍ TUNEL - HT202								
staničení	přítok (l/min)							
	vrt P1	vrt P2	vrt P3	vrt P4	vrt P5	vrt P6	vrt P7	K2
12/484	0	0	0	0	0,1	0	0	0

Tab. 13 přehled výsledků měření přítoku vody v hlavním tunelu HT202. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]

Pro zjištění hydraulických vlastností nezainjektovaného prostředí jsou vodní tlakové zkoušky v hlavních tunelech prováděny ve všech průzkumných vrtech. Po úplném ukončení injekčních prací, tedy po dokončení druhé injekční clony, je vodní tlaková zkouška provedena

v kontrolním vrtu K2. I v tomto případě se jedná o jednopakovou zkoušku, za konstantního tlaku. Délky průzkumných vrtů musely být upraveny oproti tomu, jak je uvedeno v kapitole 5.2, jelikož bylo z produkčních důvodů nutné zmenšit úhel osy vrtu od osy tunelu. Tato skutečnost však nemá vliv na průběh zkoušek. Jak je vidět z tabulky 14, v hlavním tunelu HT201 se hodnota Lugeonu u některých průzkumných vrtů pohybuje nad 0,2 což indikuje mírně vyšší propustnost masivu. Ve staničení km 12/500 jsou to vrty P1 (strop vpravo) a P5 (levá stěna dole). Ve staničení km 12/510 se jedná o vrty P1 (strop vpravo) a P4 (levá stěna nahoře). V ostatních průzkumných vrtech měření zaznamenala velice malé ztráty vody a lze tedy generálně horninové prostředí v hlavních tunelech považovat za málo propustné. Výsledky zkoušek v kontrolních vrtech se pohybují ve stejných mezích jako měření v průzkumných vrtech. Kontrolní vrt K2 ve staničení km 12/510 tunelu HT201, nemá vypovídající hodnotu. V průběhu zkoušky začala voda pronikat čelbou zpět do tunelu, což způsobilo mimořádnou ztrátu vody. Zkouška proto byla zopakována a pakr byl umístěn hlouběji do vrtu, avšak ani toto nezabránilo úniku vody z čelby do tunelu.

HT201							
staničení	vrt	čas (min)	objem vody (l)	tlak (MPa)	efektivní tlak (MPa)	délka sekce (m)	Lugeon (l/(min*m*MPa))
12/500	P1	2	13,5	1,4	1	23	0,29
	P2	2	2,5	1,4	1	23	0,05
	P3	2	7,8	1,4	1	23	0,17
	P4	2	2,8	1,4	1	23	0,06
	P5	2	10,3	1,4	1	23	0,22
	P6	2	1,4	1,4	1	23	0,03
	P7	2	5,6	1,4	1	23	0,12
	K2	2	4,5	1,4	1	16	0,14
12/510	P1	2	11,2	1,4	1	23	0,24
	P2	2	3,5	1,4	1	23	0,08
	P3	2	3,9	1,4	1	23	0,08
	P4	2	9,7	1,4	1	23	0,21
	P5	2	7,6	1,4	1	23	0,17
	P6	2	3,2	1,4	1	23	0,07
	P7	2	2,8	1,4	1	23	0,06
	K2	2	40	1,4	1	8	2,50

Tab. 14 přehled výsledků vodních tlakových zkoušek v hlavním tunelu HT201. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]

HT202							
staničení	vrt	čas (min)	objem vody (l)	tlak (MPa)	efektivní tlak (MPa)	délka sekce (m)	Lugeon (l/(min*m*MPa))
12/484	P1	2	1,4	1,4	1	11,5	0,06
	P2	2	1,9	1,4	1	11,5	0,08
	P3	2	1,4	1,4	1	11,5	0,06
	P4	2	1,6	1,4	1	11,5	0,07
	P5	2	3,6	1,4	1	11,5	0,16
	P6	2	1,1	1,4	1	11,5	0,05
	P7	2	2	1,4	1	11,5	0,09
	K2	2	0,1	1,4	1	10	0,01

Tab. 15 přehled výsledků vodních tlakových zkoušek v hlavním tunelu HT202. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]

5.6 Kontrola vlastností injekční směsi

Vlastnosti injekční směsi, jež mají vliv na výsledek injekčních prací, jsou zejména viskozita μ , dynamická mez toku τ_0 a velikost cementového zrna, kterému odpovídá minimální šířka praskliny, kterou je cementová směs schopna proniknout b_{\min} a b_{krit} , viz kapitola 4.3. Než jsou započaty samotné injekční práce, musí být ověřeny požadované vlastnosti jednotlivých směsí, jak je uvádí tabulka 6. Pravidelné zkoušky, tak jak jsou uvedeny v kapitole 4.4, byly provedeny i v případě všech injektáží, ve zkoumaném úseku. Výsledky kontrolních zkoušek vlastností injekčních směsí sumarizuje tabulka 16. Při porovnání kontrolních polních zkoušek, viz tab. 16 a pre-testingu, viz tab. 6 je zřejmé, že výsledky kontrolních zkoušek použité injekční směsi vždy splňovaly limity zjištěné během pre-testingu.

Tunel	Staničení	Směs	Číslo injektáže	Filtr pumpy Filtr 90 μm [ml]	Mud balance hustota [kg/dm³]	Marshův viskozimetr Čas průtoku 1l směsi [s]
BP1	0/066	2	1	300	1,63	37
		1	2	300	1,5	31
	0/071	2	1	300	1,62	37
		1	2	300	1,52	32
	0/081	2	1	300	1,62	39
		1	2	300	1,49	34
	0/092	2	1	300	1,61	37
		1	2	300	1,49	32
BP2	0/021	2	1	300	1,65	36
		1	2	300	1,5	33
	0/032	2	1	300	1,62	38
		2	2	300	1,61	39
	0/043	2	1	300	1,61	39
		1	2	300	1,48	30
	0/052	2	1	300	1,62	39
		1	2	300	1,53	34
HT201	12/500	2	1	300	1,65	37
		1	2	300	1,5	31
	12/510	2	1	300	1,62	39
		1	2	300	1,49	36
HT201	12/484	2	1	300	1,63	37
		1	2	300	1,51	31

Tab. 16 přehled výsledků in situ zkoušek vlastností injekčních směsí. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]

6 Zhodnocení a závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo popsat současnou tunelářskou praxi ve Skandinávii a zejména metody a teorie provádění těsnících injekčních prací u tunelových staveb, tzv. pre-groutingu. K tomuto účelu posloužily zkušenosti, získané na projektu FSE209 Tunel Skärholmen a švédský výzkum provedený v oboru injekčních prací v posledních dvaceti letech. Největší pokroky byly zaznamenány v přesnějším modelování šíření cementových suspenzí prasklinami masivu, jehož posledním vývojovým krokem je metoda RTGC (Real Time Grouting Control), umožňující sledování průběhu injektáže v reálném čase, čímž je možné korigovat stop kritéria, dána projektem injekčních prací v průběhu prací. Za zmínku stojí také práce J. Verfela, která se dá s trochou nadsázky označit za nadčasovou. Z dnešního pohledu je působivé, kolik stále validních informací jeho práce obsahují.

V praktické části této práce byly ověřovány těsnící účinky injekčních prací a vlastnosti cementových suspenzí. Za tímto účelem byl vybrán úsek projektu FSE209, procházející pod jezerem Mälaren, kde se dalo očekávat, že rozdíly v hydraulických vlastnostech neproinjektovaného a proinjektovaného horninového prostředí budou markantní. Provedeno bylo celkem 22 těsnících clon a 24 vodních tlakových zkoušek, tzv. Lugeon test. Přibližně polovinu provedených zkoušek jsem provedl osobně, eventuálně proběhly za mé participace. Základem zkoušek bylo ověřit hydraulické vlastnosti horninového prostředí před zahájením a po ukončení injekčních prací. Z výsledků provedených zkoušek je patrné, že efekt injekčních prací je minimální. Hodnoty Lugeonu před a po injekčních pracech se téměř nezměnily. Příkladem je hlavní tunel HT201, kde ve staničení km 12/500 byla průměrná hodnota Lugeonu v průzkumných vrtech 0,14. V kontrolním vrtu, po provedení injekčních prací, byla naměřena úplně stejná hodnota. Daný trend je možné pozorovat u všech čtyř zkoumaných tunelů. Tento průběh se dal očekávat již po provedení injekčních prací, z jejichž průběhu je patrné, že k vyplňování prasklin cementovou suspenzí docházelo jen zřídka. Většinou se jednalo o pouhé vyplňování injekčních vrtů. Jelikož se ve zkoumaném úseku prokazatelně nachází velice těsné horninové prostředí, což naznačují také získaná MWD data, nebylo možné dostatečně posoudit těsnící účinek provedených injekčních prací. Toto je do jisté míry způsobeno pomalými postupy z důvodu složitosti nasazené technologie a faktem, že ražby se během zkoumané periody nedostaly do poruchových zón s očekávanými zvýšenými přítoky podzemní vody.

Během injekčních prací byly kontinuálně kontrolovány reologické vlastnosti namíchané injekční směsi. K těmto účelům bylo použito ve Skandinávii tradičních polních zkoušek. Zkoušky prokazují, že použita injekční směs měla vždy požadované parametry. Zde je dobré

zmínit, že zkoušky se provádějí vždy v počátku injekčních prací. Jelikož injekční směsi na bázi mikroemntu mohou své vlastnosti měnit v relativně krátké době, existuje jistá pochybnost, že vtlačená injekční směs odpovídá svými vlastnosti požadovaným parametrům po celou dobu průběhu injekčních prací. Vývojářská divize SKANSKA AB pracuje na zavedení technologie pulzní ultrazvukové metody pro sledování reologických vlastností cementových injekčních směsí v reálném čase. Tento projekt je veden Ulfem Håkanssonem, který v současné době pracuje na odzkoušení této technologie v produkčních podmínkách. [9]

Vodní tlakové zkoušky, jako kontrola injekčních prací, se běžně neprovádějí v takovém rozsahu, jako ve zkoumaném úseku. V případech, kdy projekt injekčních prací předepisuje dvoukolovou injektáž, je vhodné tyto zkoušky provádět a potvrdit si nezbytnost druhého kola injekčních prací. Z výsledku provedených zkoušek, ve zkoumaném úseku je patrné, že druhé kolo nijak nezlepšilo hydraulické vlastnosti proinjektovaného prostředí. Doporučením je v případech dvoukolových injektáží, využít vodní tlakové zkoušky a na základě získaných výsledků rozhodnout o nutnosti druhého kola. Byl-li by tento přístup aplikován ve zkoumaném úseku, čas provedených injekčních prací by byl poloviční, jelikož druhého kola prokazatelně doposud nebylo zapotřebí.

7 Seznam použitých pramenů

Seznam použité literatury

- [1] KLEPSATEL, F.; KUSÝ, P.; MAŘÍK, L.; *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. Bratislava: Vydavatelství Jaga group, 2003. ISBN 80-889-0543-5.
- [2] NĚMEČEK, T.; PŘENOSIL, M.; Förbifart Stockholm – projekt FSE210. *TUNEL*. Praha: Česká a Slovenská tunelářská asociace ITA-AITES, 01/2017, 62-73. ISSN 1211 – 0728
- [3] NĚMEČEK, T.; Förbifart Stockholm – projekt FSE209. *TUNEL*. Praha: Česká a Slovenská tunelářská asociace ITA-AITES, 2017, 17-29. ISSN 1211 – 0728
- [4] STILLE, H.; *Rock Grouting – Theories and Application*. Riga: Vulkamedia, 2015. ISBN 978-91-637-7638-0
- [5] STILLE, H.; ERIKSSON, M.; *Cementinjektering i hart berg*. Stockholm: Svensk bergteknisk forskning, 2005. ISBN 91-631-6632-1
- [6] STILLE, B.; *Grouting Theory and Grouting Practice*. Chalmers University of Technology, 2016. ISSN 1652-9146
- [7] ČELIŠ, P.; *Výstavba horizontálních podzemních děl ve skalních horninách s vysokým nadložím a s extrémními přítoky podzemních vod - zkušenosti z ražby tunelu Hédinsfjörður na Islandu*. Ostrava 2012. Doktorská dizertační práce. Vysoká škola Báňská – Technická Universita Ostrava. Fakulta stavební. Vedoucí práce Karel VOJTASÍK.
- [8] VERFEL, J.; *Injektování hornin a výstavba podzemních stěn*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983.
- [9] HÅKANSSON, U., WIKLUND, J., KOTZÉ, M.; *In-Line Determination of Cement-Based Grout Properties Using a Pulsed Ultrasound Based Method and*

System. Grouting 2017, 356-367. <https://doi.org/10.1061/9780784480793.034>

- [10] Projektová dokumentace E4 Förbifart Stockholm – FSE209 Huvudtunnlar Skärholmen, stavební projekt, zpracoval ÅF Infrastruktur, Stockholm 2013

Seznam použitých elektronických dokumentů a www stránek

- [11] TRAFIKVERKET [online]. 2018 [cit. 2018-11-25]. Om E4 Förbifart Stockholm-projektet. Dostupné z WWW: < <https://www.trafikverket.se/naradig/Stockholm/projekt-i-stockholms-lan/Forbifart-stockholm/Om-projektet/>>
- [12] TRAFIKVERKET [online]. 2018 [cit. 2018-11-25]. Bakgrund Förbifart Stockholm. Dostupné z WWW: < <https://www.trafikverket.se/naradig/Stockholm/projekt-i-stockholms-lan/Forbifart-stockholm/Om-projektet/Bakgrund/>>
- [13] TRAFIKVERKET [online]. 2018 [cit. 2018-11-25]. Tunnlarna i Förbifart Stockholm. Dostupné z WWW: <<https://www.trafikverket.se/naradig/Stockholm/projekt-i-stockholms-lan/Forbifart-stockholm/Tunnlar/>>
- [14] TRAFIKVERKET [online]. 2018 [cit. 2018-11-25]. Effektivare nord-sydliga förbindelser i Stockholmsområdet. Dostupné z WWW: <https://www.trafikverket.se/contentassets/a8f6ee8778ee4ce2a05b8c7dc3ea0b25/forstudie/forstudie_dell_forbifart_stockholm.pdf>

8 Seznam obrázků

Obr. 1 extrémní přítoky podzemní vody během ražby tunelu Hédinsfjörður. Zdroj [7].....	9
Obr. 2 nová městská centra v okolí Stockholmu. Zdroj [2]	10
Obr. 3 silniční spojení přes jezero Mälaren. Zdroj [2]	11
Obr. 4 podélný řez trasy Förbifart Stockholm. Zdroj [13]	12
Obr. 5 Vrtné schéma těsnící clony typu A v hlavním tunelu HT201. Zdroj [autor Underground Manager]	14
Obr. 6 Situace části projektu FSE209 mezi staničením km 10/000 a km 13/000. Zdroj Zdroj [autor AutoCAD 2019].....	15
Obr. 7 Těsnící injektáž předpolí (Pre-grouting) se znázorněnou šířkou praskliny b a penetrační délkou injekční směsi I . Zdroj Zdroj [autor AutoCAD 2019].....	18
Obr. 8 1D proudění. Zdroj Zdroj [autor AutoCAD 2019]	19
Obr. 9 2D proudění. Zdroj [autor AutoCAD 2019]	20
Obr. 10 paralelní uskupení prasklin. Zdroj Zdroj [autor AutoCAD 2019]	21
Obr. 11 rozložení transmisivity prasklin (od nejmenší po největší) měřené v 5m úsecích vertikálního vrtu, Hernquist a kolektiv (2014). Zdroj [4]	22
Obr. 12 tečení směsi v prasklině, p_g je tlak injekční směsi, p_w tlak vody a τ smykové napětí. Zdroj [autor AutoCAD 2019].....	23
Obr. 13 relativní penetrační délka I_D jako funkce relativního času injektáže t_D znázorněna v logaritmickém měřítku, Gustafson a Stille (2005). Zdroj [4]	25
Obr. 14 filtr pumpa ke stanovení b_{min} . Zdroj [autor foto].....	27
Obr. 15 Vrtací vůz Atlas Copco WE3 a inektažní stanice Unigrout Smart M4 na kolovém podvozku. Zdroj [výrobní dokumentace SBT Sverige AB]	30
Obr. 16 zkušební sada pro ověření vlastností injekčních směsí během injektáže (Marshův viskozimetr, filtr pumpa s filtrem 90 μ m a mud balance test). Zdroj [autor foto]	31
Obr. 17 A – vodní tlaková zkouška v celé délce vrtu za využití jednoho pakru, B – vodní tlaková zkouška v úseku vrtu ohraničeného dvojicí pakrů. Zdroj [autor AutoCAD 2019]	32
Obr. 18 tunely hlavní trasy HT201 a HT202 a provizorní díla BP1 a BP2 v pasáži pod jezerem Mälaren. Zdroj [autor AutoCAD 2019].....	33
Obr. 19 metodika ověřování účinků těsnící njektáže v provizorních tunelech a tunelech hlavní trasy. Zdroj [autor]	34
Obr. 20 Jednotlivé vějíře těsnící clony v případě průzkumných tunelů. Zdroj [10]	35
Obr. 21 grafická prezentace MWD dat z vrtání těsnící clony v BP1 ve staničení km 0/092. Zdroj [Björn Stille Rockma 2018]	36
Obr. 22 grafická prezentace MWD dat všech vrtů v pasáži pod jezerem Mälaren, tlustou čarou je naznačena pozice čelby v jednotlivých tunelech. Zdroj [Björn Stille Rockma 2018]	37

9 Seznam tabulek

Tab. 1 Dílčí projekty Förbifart Stockholm. Zdroj [2]	13
Tab. 2 přehled základních parametrů tunelů hlavní trasy a tunelových ramp. Zdroj [3]	17
Tab. 3 vztah mezi průtočností puklin a jejich šířkou. Zdroj [4]	20
Tab. 4 vliv základních parametrů na čas potřebný k dosažení požadované penetrační délky. Zdroj [4]	26
Tab. 5 požadované vlastnosti cementových injekčních směsí na projektu FSE209. Zdroj [10]	28
Tab. 6 vlastnosti injekčních směsí 1, 2 a 3 INJ30 a superplatifikátoru iFlow. Zdroj [výrobní dokumentace SBT Sverige AB]	29
Tab. 7 interpretace Lugeon testu. Zdroj [5]	32
Tab. 8 stručný souhrn provedených injekčních prací ve zkoumaném úseku. Zdroj [výrobní dokumentace SBT Sverige AB]	39
Tab. 9 přehled výsledků měření přítoků vody v průzkumných tunelech BP1 a BP2. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]	40
Tab. 10 přehled výsledků vodních tlakových zkoušek v průzkumném tunelu BP1. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]	40
Tab. 11 přehled výsledků vodních tlakových zkoušek v průzkumném tunelu BP2. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]	41
Tab. 12 přehled výsledků měření přítoku vody v halvním tunelu HT201. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]	41
Tab. 13 přehled výsledků měření přítoku vody v halvním tunelu HT202. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]	41
Tab. 14 přehled výsledků vodních tlakových zkoušek v hlavním tunelu HT201. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]	42
Tab. 15 přehled výsledků vodních tlakových zkoušek v hlavním tunelu HT202. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]	43
Tab. 16 přehled výsledků in situ zkoušek vlastností injekčních směsí. Zdroj [autor, výrobní dokumentace SBT Sverige AB]	44

10 Seznam grafů

graf 1 - spotřeba cementových směsí v jednotlivých případech injekčních prací. Ve stančení km 0/032 bylo chybně použito směsi 2 v obou kolech injektáže. Zdroj [autor] 38